



**UCATÓLICA**  
de Colombia

METODOLOGÍA DE DISEÑO PARAMÉTRICO PARA INVERNADEROS EN  
CULTIVOS DE ARVEJA UBICADOS EN SOGAMOSO Y PUERTO BOYACÁ -  
COLOMBIA.

**Maestrando**  
Arq. Arturo Galvis Rojas

**Director temático**  
Arq. Andrea Viviana Cifuentes Cuellar

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Maestría en Diseño  
Sostenible

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. FACULTAD DE DISEÑO  
MAESTRÍA EN DISEÑO SOSTENIBLE  
BOGOTÁ D.C

2021





## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia.](#)

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

Bogotá D.C, septiembre de 2021

## Resumen

El problema de seguridad alimentaria a nivel mundial es uno de los temas más importantes a resolver, cabe resaltar que está dentro de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), y que, en Colombia, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), durante el 2017, éste fue el hito con más afectación a causa del cambio climático. Esto por el impacto negativo que ejercen las variaciones climáticas sobre los cultivos, a razón de la poca tecnología utilizada en el sector agrícola. En los últimos años uno de los departamentos más golpeado por eventos climáticos es Boyacá, por lo que se hace evidente la importancia de dar una solución sostenible, pensada desde la arquitectura, y dirigida, específicamente a invernaderos pasivos utilizados para proteger los cultivos de arvejas ante las inclemencias del clima. En consecuencia, surge el objetivo de este trabajo, que busca estructurar un método de diseño paramétrico por medio de un árbol de decisiones, usando estrategias arquitectónicas de diseño pasivo, para invernaderos de cultivos de arveja, en los municipios de Sogamoso y Puerto Boyacá, tomando como referencia dos contextos térmicamente opuestos, con el fin de explorar la conducta de dicho proceso bajo distintas líneas base, sobre un mismo tipo de cultivo, analizados bajo las variables de: tipología, orientación y materiales utilizados en la envolvente, esto, por medio de simulaciones computarizadas en el software DesignBuilder, para obtener diferentes combinaciones que logren las condiciones ambientales adecuadas para el correcto desarrollo fenológico<sup>1</sup> del cultivo de arveja.

Según lo anterior, se evidencia que la tipología de invernadero asimétrico tiene un alto grado de adaptabilidad en los dos casos, junto a los materiales polietilenos de baja densidad (PEBD) y polietilenos de alta densidad (PEAD), variables comunes en los resultados de los lugares analizados.

1- Fenología: La fenología es la ciencia que estudia las diferentes fases de desarrollo de los cultivos y sus requerimientos ambientales.

**Palabras clave:**

Seguridad Alimentaria, Invernadero, Metodología, Diseño paramétrico.

## **Abstract**

The problem of food security worldwide is one of the most important topics to solve, being within the Sustainable Development Goals (SDGs), and that, in Colombia according to IDEAM and UNDP in 2017, is the indicator with the highest risk of suffering due to climate change. This is due to the negative impact exerted by climate variations on crops, having a very low adaptive capacity, due to the little technology and innovation generated in the agricultural sector. In recent years, one of the departments most affected by climatic events such as frosts and floods is Boyacá, generating the destruction of about 40 thousand hectares of pastures and crops, additionally, occupying the second place nationally in extension of pea cultivation, but the eleventh position in terms of crop yield, showing serious problems in terms of performance, therefore, a solution based on sustainability must be given, thought from the architecture through the design of greenhouses that provide protection to pea crops, using only passive design strategies.

Consequently, the objective of this work is to structure a parametric design methodology by means of a decision tree, based on passive design architectural strategies, for greenhouses for pea crops in the municipalities of Sogamoso and Puerto Boyacá in the department of Boyacá. Taking as reference two thermally opposite contexts, in order to explore the behavior of the methodology under different baselines, on the same type of crop, analyzed under the variables of typology, orientation and materials used in the envelope by means of computer simulations in the DesignBuilder software, resulting in different combinations that allow achieving the appropriate environmental conditions for the correct phenological<sup>1</sup> development of the pea crop.

From this process, it is evident that the asymmetric greenhouse typology has a high degree of adaptability in the two contexts, together with LDPE and HDPE materials, being these variables

1- Phenology: Phenology is the science that studies the different developmental stages of crops and their environmental requirements.

common in the results of the different sites analyzed.

**Key words:**

Food safety, Greenhouse, Methodology, Parametric design.



# Contenido

Introducción .....	15
Pregunta problematizadora.....	16
Objetivos .....	16
Objetivo general .....	16
Objetivos específicos .....	17
Hipótesis.....	17
Justificación.....	17
Marco de referencia.....	21
Marco contextual.....	21
Temperatura .....	24
Humedad .....	25
Viento.....	26
Precipitaciones .....	27
Nubosidad .....	28
Marco Teórico/conceptual .....	29
Invernadero .....	29
Fenología.....	30
Diseño pasivo .....	31

Diseño paramétrico .....	33
Árbol de decisión .....	34
Variable .....	36
Marco Legal .....	37
Estado del arte .....	38
Diseño metodológico .....	45
Fases Metodológicas .....	46
Fase I: Búsqueda y recolección de información .....	46
Fase II: Definición de variables y estructuración del árbol de decisiones .....	46
Fase III: Simulación computarizada y análisis de resultados.....	47
Fase IV: Estructuración de la metodología de diseño a partir de resultados obtenidos ...	47
Desarrollo de metodología de diseño paramétrico .....	48
Fase I: Búsqueda y recolección de información .....	48
Variables climáticas .....	48
Condiciones ambientales: Arveja ( <i>Pisum sativum</i> L.).....	59
Variables Físicas del invernadero: .....	62
Fase II: Definición de variables y estructuración del árbol de decisiones .....	67
Fase III: Simulación computarizada y análisis de resultados.....	71
Primera ronda de simulaciones .....	75
Segunda ronda de simulaciones .....	77

Tercera ronda de simulaciones .....	80
Simulación de iluminación natural: .....	84
Fase IV: Estructuración de la metodología de diseño a partir de resultados obtenidos .....	90
Límites de investigación: .....	93
Conclusiones: .....	94
Líneas futuras de investigación: .....	96
Referencias bibliográficas .....	97

## Lista de Figuras

<i>Figura 1 Clasificación climática Caldas-Lang departamento de Boyacá Fuente: IDEAM (2010). Disponible en la web:</i> <i><a href="http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/temperatura-boyaca.pdf">http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/temperatura-boyaca.pdf</a></i> .....	22
<i>Figura 2 Temperatura media anual (°C) Departamento de Boyacá Fuente: IDEAM (2010). Disponible en la web:</i> <i><a href="http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/temperatura-boyaca.pdf">http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/temperatura-boyaca.pdf</a></i> .....	24
<i>Figura 3 Temperatura máxima y mínima promedio en los municipios de Sogamoso y Puerto Boyacá a lo largo del año.</i> .....	25
<i>Figura 4 Probabilidad de condiciones bochornosas en Puerto Boyacá a lo largo del año.</i> .....	26
<i>Figura 5 Velocidad promedio del viento</i> .....	27
<i>Figura 6 Precipitación de lluvia mensual promedio</i> .....	28
<i>Figura 7 Probabilidad de cielo despejado</i> .....	29
<i>Figura 8 Nodo de decisión Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC BY-NC-ND ....</i>	35
<i>Figura 9. Nodo de probabilidad Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC BY-NC-ND</i> .....	35
<i>Figura 10. Ramificaciones alternativas Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC</i>	

BY-NC-ND.....	35
Figura 11 Alternativa rechazada Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC BY-NC-ND.....	35
Figura 12. Nodo terminal Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC BY-NC-ND .....	35
Figura 13 Control general de temperatura Fuente: (Díaz Sarmiento & Solano Rojas, 2006, p.111) CC BY-NC-ND .....	41
Figura 14 Control de apertura de ventanas. Fuente: (Díaz Sarmiento & Solano Rojas, 2006, p.112) CC BY-NC-ND ...	41
Figura 15 Control cierra de ventanas Fuente: (Díaz Sarmiento & Solano Rojas, 2006, p.112) CC BY-NC-ND .....	42
Figura 16 Temperatura de bulbo seco, Sogamoso Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND .....	49
Figura 17 Día más cálido del año – 29 de julio, Sogamoso Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND.....	49
Figura 18 Día más frío del año – 16 de enero, Sogamoso Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND.....	50
Figura 19 Humedad relativa, Sogamoso Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND.....	51
Figura 20 Diagrama estereográfico – Temperatura promedio, Sogamoso Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND .....	52
Figura 21 Proyección ortográfica – Temperatura promedio, Sogamoso Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND .....	52
Figura 22 Orientación óptima invernadero, Sogamoso Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND .....	53
Figura 23 Dirección, duración y velocidad del viento anual, Sogamoso Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND .....	53
Figura 24 precipitaciones anuales, Sogamoso Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND .....	54
Figura 25 Temperatura de bulbo seco, Puerto Boyacá Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por	

<i>Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND</i> .....	54
<i>Figura 26 Día más cálido del año – 11 de octubre, Puerto Boyacá Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND</i> .....	55
<i>Figura 27 Día más frío del año – 16 de enero, Puerto Boyacá Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND</i> .....	55
<i>Figura 28 Humedad relativa, Puerto Boyacá Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND</i> .....	56
<i>Figura 29 Proyección ortográfica – Temperatura promedio, Puerto Boyacá Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND</i> .....	57
<i>Figura 30 Proyección ortográfica – Temperatura promedio, Puerto Boyacá Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND</i> .....	57
<i>Figura 31 Orientación óptima invernadero, Puerto Boyacá Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND</i> .....	58
<i>Figura 32 Dirección, duración y velocidad del viento anual, Puerto Boyacá Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND</i> .....	58
<i>Figura 33 Precipitaciones anuales, Puerto Boyacá Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND</i> .....	59
<i>Figura 34 Aspectos climáticos Arveja (Pisum sativum L.) Fuente: (CIREN, 1989, p.15) CC BY-NC-ND</i> .....	60
<i>Figura 35 Condiciones edafoclimáticas. Fuente: extraído de (Saénz Torres, 2019, p.10) CC BY-NC-ND</i> .....	60
<i>Figura 36 Aspectos climáticos Fuente: extraído de (CIREN, 2017, p.1) CC BY-NC-ND</i> .....	61
<i>Figura 37 Intensidad de luz de crecimiento (<math>\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}</math>) Fuente: (Lee &amp; Whitmarsh, 1989, p.935) CC BY-NC-ND</i> .....	61
<i>Figura 38 Punto de compensación de la luz y del punto de saturación de la luz Fuente: (Chen Lopez, 2021) Disponible en la web: <a href="https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo/">https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo/</a> CC BY-NC-ND</i> .....	62
<i>Figura 39 PPFD a lux con luz solar Fuente: APOGEE instruments. Disponible en la web: <a href="https://www.apogeeinstruments.com/conversion-ppfd-to-lux/">https://www.apogeeinstruments.com/conversion-ppfd-to-lux/</a> CC BY-NC-ND</i> .....	62

Figura 40 Invernadero tipo parral Fuente: IEP Invernaderos (2017). Disponible en la web:	
<a href="http://www.inverelpilar.com/es/invernaderos/invernaderos-parral">http://www.inverelpilar.com/es/invernaderos/invernaderos-parral</a> CC BY-NC-ND.....	64
Figura 41 Invernadero tipo raspa Fuente: IEP Invernaderos (2017). Disponible en la web:	
<a href="http://www.inverelpilar.com/es/invernaderos/invernaderos-parral">http://www.inverelpilar.com/es/invernaderos/invernaderos-parral</a> CC BY-NC-ND.....	64
Figura 42 Invernadero tipo asimétrico Fuente: NOVAGRIC (2016). Disponible en la web:	
<a href="https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernaderos-asimetricos#:~:text=Se%20denominan%20Invernaderos%20Tropicales%20porque,m%C3%A1s%20inclinado%20que%20el%20otro.">https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernaderos-asimetricos#:~:text=Se%20denominan%20Invernaderos%20Tropicales%20porque,m%C3%A1s%20inclinado%20que%20el%20otro.</a> CC BY-NC-ND.....	64
Figura 43 Invernadero tipo capilla Fuente: NOVAGRIC (2016). Disponible en la web:	
<a href="https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernadero-capilla">https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernadero-capilla</a> CC BY-NC-ND.....	64
Figura 44 Invernadero tipo diente de sierra Fuente: Hortelana. Disponible en la web:	
<a href="http://www.hortelana.com/dientesdesierra.html">http://www.hortelana.com/dientesdesierra.html</a> CC BY-NC-ND.....	65
Figura 45 Invernadero tipo túnel Fuente: NOVAGRIC (2016). Disponible en la web:	
<a href="https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernadero-tunel">https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernadero-tunel</a> CC BY-NC-ND.....	65
Figura 46 Invernadero tipo venlo Fuente: AgriExpo (2021). Disponible en la web:	
<a href="https://www.agriexpo.online/es/prod/zwirs-projects-bv/product-181093-46772.html">https://www.agriexpo.online/es/prod/zwirs-projects-bv/product-181093-46772.html</a> CC BY-NC-ND .....	65
Figura 47 Invernadero tipo gótico Fuente: Hidroponía (2015). Disponible en la web:	
<a href="http://hidroponia.mx/invernadero-tipo-gotico-cuales-son-sus-caracteristicas/">http://hidroponia.mx/invernadero-tipo-gotico-cuales-son-sus-caracteristicas/</a> CC BY-NC-ND .....	65
Figura 48 Características de los diferentes tipos de plásticos para invernaderos Fuente: (NOVAGR, 2016). Disponible en la web: <a href="https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/materiales-y-estructuras/plasticos-invernaderos">https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/materiales-y-estructuras/plasticos-invernaderos</a> CC BY-NC-ND.....	66
Figura 49 Metodología de diseño para invernadero Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND.....	69
Figura 50 Esqueleto inicial árbol de decisiones Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND .....	70
Figura 51 Configuración aberturas Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND ....	71

<i>Figura 52 Invernadero tipo parral Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 53 Invernadero tipo raspa Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 54 Invernadero tipo asimétrico Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND</i>	<i>72</i>
<i>Figura 55 Invernadero tipo doble capilla Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND</i>	<i>72</i>
<i>Figura 56 Invernadero diente de sierra Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND</i>	<i>72</i>
<i>Figura 57 Invernadero tipo tunel Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 58 Invernadero tipo gótico Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 59 Invernadero tipo venlo Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 60 Datos térmicos material PEBD Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 61 Datos térmicos material PEAD Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 62 Datos térmicos material EVA Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND</i>	<i>74</i>
<i>Figura 63 Datos térmicos material PVC Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND</i>	<i>74</i>
<i>Figura 64 Datos térmicos material PC Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND</i>	<i>74</i>
<i>Figura 65 Variación de la temperatura operativa y la humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos en Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 66 Variación de la temperatura operativa y la humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos en Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 67 Variación de la temperatura operativa y la humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos y orientación en Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 68 Variación de la temperatura operativa y la humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos y</i>	

<i>orientación en Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 69 Variación de la temperatura operativa y humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos, orientación y materiales en Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 70 Variación de la temperatura operativa y humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos, orientación y materiales en Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 71 Valores de simulación – Iluminación natural Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 72 Simulación de iluminación natural Combinación 1 – Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 73 Simulación de iluminación natural Combinación 2 – Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 74 Simulación de iluminación natural Combinación 3 – Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 75 Simulación de iluminación natural Combinación 4 – Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 76 Simulación de iluminación natural Combinación 1 – Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 77 Simulación de iluminación natural Combinación 2 – Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 78 Simulación de iluminación natural Combinación 3 – Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 79 Simulación de iluminación natural Combinación 4 – Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 80 Árbol de decisiones preliminar Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>88</i>



<i>Figura 81 Invernadero tipo asimétrico con rejillas Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 82 Invernadero tipo túnel con rejillas Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 83 Árbol de decisiones final - Sogamoso Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 84 Árbol de decisiones final – Puerto Boyacá Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>92</i>

## **Lista de Tablas**

<i>Tabla 1 Estadios de desarrollo de la arveja (Pisum sativum L.) .....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 2 Ventajas y desventajas de diferentes tipologías de invernadero Fuente: (Díaz Sarmiento &amp; Solano Rojas, 2006, p.24) CC BY-NC-ND.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 3 Rango de temperatura y humedad ideal Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 4 Tipos de invernaderos y dimensiones Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 5 Datos Climáticos y semana se simulación Sogamoso Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 6 Datos Climáticos y semana se simulación Puerto Boyacá Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 7 Variables y codificación – Tipología Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 8 Variables y codificación – Orientación Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 9 Variables y codificación – Materialidad Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 10 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías simuladas bajo el clima de Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 11 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías simuladas bajo el clima de Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 12 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías + orientación simuladas bajo el clima de Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 13 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías + orientación simuladas bajo el clima de Puerto</i>	

<i>Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 14 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías + orientación + material simuladas bajo el clima de Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 15 Combinaciones finales de invernadero ubicado en Sogamoso Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 16 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías + orientación + material simuladas bajo el clima de Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 17 Combinaciones finales de invernadero ubicado en Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND .....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 18 Resultados de temperatura y humedad relativa con rejillas bajo el clima de Puerto Boyacá Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND.....</i>	<i>89</i>

## **Introducción**

El concepto de seguridad alimentaria y nutricional, tomado de la Tercera Comunicación Nacional del Cambio Climático (2017, p.30), se define como “la disponibilidad suficiente y estable de alimentos, el acceso y el consumo oportuno y permanente de los mismos en cantidad, calidad e inocuidad por parte de todas las personas, bajo condiciones que permitan su adecuada utilización biológica, para llevar una vida saludable y activa”. Cabe recalcar que el departamento de Boyacá se encuentra en el sexto puesto a nivel nacional respecto a la amenaza de sufrir a futuro, problemas de seguridad alimentaria a razón del cambio climático.

Adicionalmente, la Encuesta Nacional Agropecuaria “ENA” publicada en la página web del DANE (2019), posiciona al departamento de Boyacá en el segundo puesto a nivel nacional en extensión del cultivo de arveja con 11.318 hectáreas, sin embargo, están ubicados en el puesto 11 en nivel de rendimiento, con 3.3 toneladas por hectárea, por lo que existe un claro indicio de que este proceso tiene grandes pérdidas, bien sea por causas naturales, o antrópicas, en cuanto a su forma de cultivar.

Asimismo en los últimos años, el departamento de Boyacá se ha visto afectado por cambios extremos de temperatura, según indicó Caracol radio Tunja (2020b) a lo largo del año 2020, momento en el que informó sobre la destrucción de alrededor de 40 mil hectáreas de pastos y cultivos; en consecuencia, uno de los años más atípicos en cuestión de temperatura a nivel nacional, situación que llegó a ser declarada calamidad pública por el Consejo Departamental de Gestión del Riesgo, en casos puntuales como el del municipio de Sogamoso, en el que se registraron temperaturas de  $-4.8^{\circ}\text{C}$ .

En conclusión, el sector agrario fue uno de los más perjudicados, en especial los cultivadores

de leguminosas, quienes tuvieron grandes problemas con los sembradíos de arveja a cielo abierto, el DANE (2020, p.2) en su informe especial de precios mayoristas y abastecimiento, mostró un alza en los precios de la arveja de aproximadamente \$600 COP en el mes de febrero, hecho que repercutió en temas de seguridad alimentaria a nivel nacional.

Con base en esta problemática, se plantea el uso de invernaderos diseñados a partir de estrategias arquitectónicas pasivas, con el fin de mitigar factores climáticos adversos que generan afectaciones y pérdidas en los cultivos de arveja ubicados en Boyacá de este modo, se pueden lograr las condiciones ambientales adecuadas para un correcto desarrollo fenológico del cultivo, sin necesidad de utilizar equipos mecánicos, consiguiendo así, el planteamiento de soluciones sostenibles adaptadas al campo agrario, que permitan a los campesinos mitigar los daños generados en los cultivos de arveja por el cambio climático, y reduciendo además, la amenaza de sufrir problemas relacionados a la seguridad alimentaria y nutricional en el departamento de Boyacá.

### **Pregunta problematizadora**

¿Por medio de qué estrategias pasivas se puede implementar un diseño paramétrico en un invernadero para lograr las condiciones ambientales adecuadas, logrando un correcto desarrollo fenológico de un cultivo de arveja ubicado en los municipios de Sogamoso y Puerto Boyacá del departamento de Boyacá?

### **Objetivos**

#### **Objetivo general**

Estructurar una metodología de diseño paramétrico a partir de estrategias arquitectónicas de diseño pasivo, para invernaderos de cultivos de arveja, en los municipios de Sogamoso y Puerto Boyacá en el departamento de Boyacá.

### **Objetivos específicos**

- Consultar y determinar variables de diseño paramétrico, tanto ambientales como físicas, para lograr un correcto desarrollo fenológico del cultivo en invernaderos.
- Definir la relación que existe entre las variables a utilizar en las simulaciones computarizadas, para obtener una estructura inicial del árbol de decisiones como proceso de diseño.
- Implementar y definir la estructura inicial del árbol de decisiones según los datos recopilados en las simulaciones computarizadas, con el fin de procesarlos y analizarlos para conseguir las condiciones ambientales adecuadas que lleven a un correcto desarrollo fenológico del cultivo.
- Estructurar la metodóloga de diseño para invernaderos de cultivos de arveja, a partir de estrategias arquitectónicas de diseño pasivo, en los municipios de Sogamoso y Puerto Boyacá.

### **Hipótesis**

Con la implementación de un sistema de diseño paramétrico en un invernadero, en el que únicamente se usen estrategias pasivas, se podrán garantizar las condiciones ambientales adecuadas para lograr un correcto desarrollo fenológico de cultivos de arveja ubicados en Sogamoso y Puerto Boyacá.

### **Justificación**

La importancia de dar al sector agrario, una solución sostenible, pensada desde la arquitectura, específicamente a los invernaderos utilizados para cultivos de arvejas por medio de estrategias pasivas, se basa en cuatro puntos fundamentales: como primera medida se debe tener en cuenta el

contexto actual del cambio climático, por otra parte, la latente amenaza de sufrir problemas de seguridad alimentaria, la posición actual de Colombia en temas agrícolas, y por último, la necesidad de cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible.

Respecto al cambio climático, éste está en un punto neurálgico, razón por la que se hace indispensable generar acciones inmediatas tanto en investigación, como en la formulación de propuestas de diseño, encaminadas a atenuar los cambios de temperatura que se presentan a nivel global.

La Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), (2018, p.6) proyectó para el año 2050 pérdidas superiores al 25% de los cultivos con un aumento de 2°C, perspectiva que modificarán la variabilidad interanual del rendimiento en los cultivos, generado en un contexto global en el que la demanda alimenticia tiene tendencia a incrementar al pasar de los años; apoyando esta idea de la afectación que tiene el cambio climático en diferentes cultivos Jarma Orozco et al. (2012, p.71) expresa que:

El cambio climático registrado en los últimos 30 años ha tenido un impacto en la distribución, la abundancia, la fenología y la fisiología de muchas especies y se presume un incremento en la temperatura de 1,1°C a 6,4°C, para 2100, con consecuencias de erosión genética, extinción de muchas especies vegetales e inseguridad alimentaria.

En el caso específico de los cultivos de arveja, Cortés & Alarcón (2016, p.52) expresan que Colombia, visto bajo la perspectiva del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC), plantean dos posibles escenarios: el primero, y catalogado como positivo, con un alza de 1.8°C; y el segundo definido como pesimista; en él se percibe un alza de 4°C en las regiones de la sabana cundiboyacense, lo que conlleva a una repercusión sobre los cultivos de arveja y papa para el año

2040, tiempo en el que se prevé que desaparecerán por completo.

En consecuencia, a lo anteriormente expuesto respecto al cambio climático, se deben tener en cuenta los propósitos de desarrollo sostenible planteados por las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura “FAO”, en especial el segundo objetivo, hambre cero, dentro del cual se resaltan dos indicadores específicos que van de la mano con las intenciones del presente trabajo:

### **2.3 - Duplicar la productividad y los ingresos de pequeños productores de alimentos.**

Para 2030, duplicar la productividad agrícola y los ingresos de los pequeños productores de alimentos, en particular las mujeres, los pueblos indígenas, los agricultores familiares, los pastores y los pescadores; bien sea mediante el acceso seguro e igualitario a la tierra; o por medio de otros recursos e insumos productivos; también a través de conocimientos y servicios financieros; o con la implementación de mercados y oportunidades de valor agregado y por último, por intermedio de empleo no agrícola.

### **2.4 - Producción sostenible de alimentos y prácticas agrícolas resilientes.**

Para 2030, garantizar sistemas de producción de alimentos sostenibles, e implementar prácticas agrícolas resilientes que no solo sean favorables para el aumento en la productividad y producción, sino que a su vez ayuden a mantener los ecosistemas, a que fortalezcan la capacidad de adaptación a los cambios climáticos que se puedan presentar como: condiciones climáticas extremas, sequías, inundaciones y otros desastres, y a que mejoren progresivamente la calidad de la tierra y el suelo. (2021)

Es importante mencionar que tanto la productividad, como las prácticas agrícolas resilientes,

cobran importante sentido en el contexto de este trabajo, teniendo en cuenta que Colombia es considerada por la FAO como:

El cuarto país de América Latina con tierras disponibles para producción agrícola, por lo tanto, podría expandir su superficie cultivada sin afectar áreas de bosques naturales. Además, es el tercer país con más recursos de agua, diversidad climática y tasas de precipitación anual, características que potencializan su rol en la producción de alimentos, perfilándose como una gran despensa. (2020, p.1)

A pesar de contar con este escenario ideal, el sector agropecuario colombiano tiene una baja productividad si se compara con otros países de la región, comportamiento que se vio apoyado por el contexto pandémico actual, el cual afectó económicamente a los cultivadores, debido a la poca oferta de alimentos por parte de sectores como la hotelería, establecimientos de comida, colegios, entre otros, y que además puso a prueba la logística de transporte entre el sector rural y urbano.

Por todo lo anterior, se hace indispensable el impulsar estrategias pensadas desde el ámbito arquitectónico, que potencien soluciones resilientes y sostenibles, que a su vez apoyen de manera integral tanto los problemas existentes en el agro colombiano, como los retos que plantea el cambio climático y sus posibles consecuencias en la seguridad alimentaria y en los cultivos; así como lo expresa la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), acto que da un impulso a la agricultura climáticamente inteligente basada en tres pilares fundamentales:

Incrementar de forma sostenible la productividad y los ingresos agrícolas; adaptar y desarrollar resiliencia al cambio climático; reducir y/o eliminar las emisiones de gases de efecto invernadero donde sea posible. (2018, p.36)



## **Marco de referencia**

A continuación, se expondrán los contextos en que se plantea estructurar este caso de estudio, las teorías, los conceptos que se tomarán de apoyo para desarrollar la intención general del trabajo, así como las normativas que se deben cumplir y el estado actual de este tipo de investigaciones.

## **Marco contextual**

Las características climáticas de Boyacá se determinan de la siguiente manera: pertenecen mayormente a pisos térmicos fríos con diferentes rangos de humedad, climas templados en el oriente con temperaturas promedio de 20°C y climas cálidos húmedos hacia el occidente con temperaturas que pueden alcanzar los 28°C. Para este caso de estudio, se plantea la simulación de un clima base ubicado en Sogamoso, municipio que se encuentra en la zona centro, y que hace parte de la sabana cundiboyacense, con climas que varían entre frío semiárido, y muy frío semihúmedo; también se propone la simulación de un clima que contraste, como es el caso de Puerto Boyacá el cual tiene un clima cálido húmedo como se evidencia en la Figura 1

*Clasificación climática Caldas-Lang departamento de Boyacá*

*Fuente: IDEAM (2010). Disponible en la web: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/temperatura-boyaca.pdf>, éste último, caracterizado por tener altas temperaturas a lo largo del año. Dichos procedimientos se formulan con el fin de visualizar los cambios que existen al implementar la metodología en diferentes climas dentro de una misma región.*

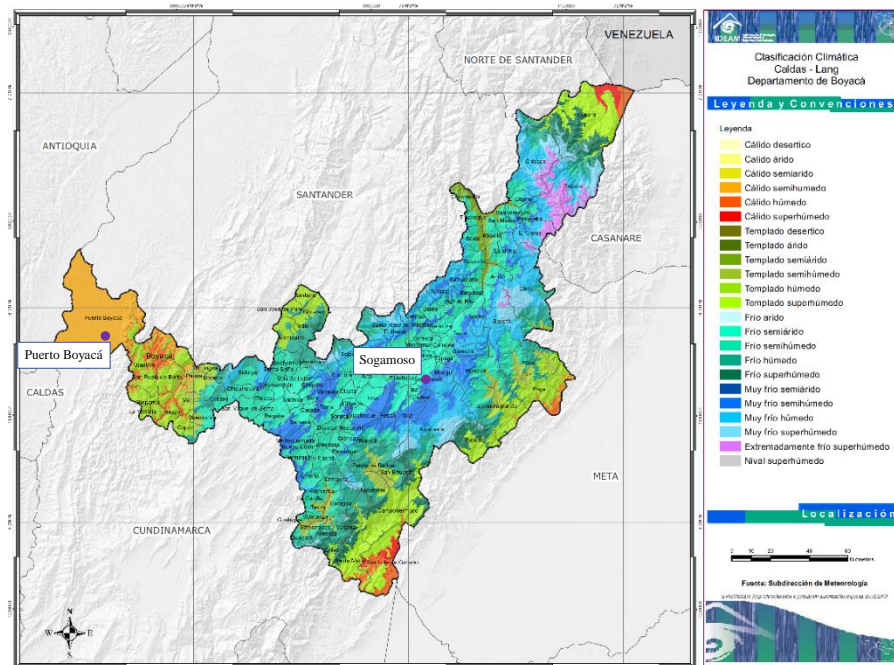


Figura 1 Clasificación climática Caldas-Lang departamento de Boyacá  
 Fuente: IDEAM (2010). Disponible en la web: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/temperatura-boyaca.pdf>

Como lo informó la Alcaldía de Sogamoso, (2018) en la sección de geografía de su página web, el municipio de Sogamoso ubicado en el departamento de Boyacá en la región del alto Chicamocha, colinda al norte con los municipios de Nobsa y Tópaga, al oriente con los municipios de Tópaga, Monguí y Aquitania, al sur con los municipios de Aquitania, Cuitiva e Iza, y al occidente con los municipios de Tibasosa, Firavitoba e Iza. Se encuentra a una altitud cercana a las 2.600 m.s.n.m, con una zona urbana de 30.54 Km<sup>2</sup> y un área de 178Km<sup>2</sup> destinada para el sector rural, lo que se traduce en una cifra considerable para el desarrollo de la vocación agraria en el municipio.

Por su parte la alcaldía de Puerto Boyacá, (2021) expresa que el municipio se encuentra en el Magdalena Medio Boyacense, sobre la margen derecha del río Magdalena, colinda al norte con el municipio de Bolívar (Santander), al sur con los municipio de Puerto Salgar y Yacopí (Cundinamarca), al oriente con el municipio de Otanche (Boyacá) y al occidente con los

municipios de Puerto Nare, Puerto Triunfo, Puerto Berrío y Sonsón (Antioquia). Se encuentra a 130 m.s.n.m, con un área urbana de 357 Km<sup>2</sup> y un área de 146.734 Km<sup>2</sup> destinada para la ruralidad.

En el municipio de Sogamoso, se pueden evidenciar tres tipos de clasificación climática, en la zona más alta encontramos un clima frío húmedo con temperaturas de entre 8°C a 12°C, en medio de la montaña, muy frío y semihúmedo, y a la llegada del altiplano, frío semiárido, con temperaturas entre 12°C a 16°C; en contraste, Puerto Boyacá tiene una predominancia climática de cálido semihúmedo, con temperaturas entre 26°C a 28°C, en algunos lugares se registran temperaturas superiores a los 28°C como se muestra en la Figura 2 *Temperatura media anual (°C)*

*Departamento*

*de*

*Boyacá*

*Fuente: IDEAM (2010). Disponible en la web: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/temperatura-boyaca.pdf>.*

Para obtener datos concretos de cada uno de componentes climáticos en los dos casos anteriormente expuestos, a continuación, se presentarán las principales variables climáticas que se deben tener en cuenta en un correcto análisis contextual, estos datos fueron sacados de (Weather Spark, n.d.), los datos específicos de precipitación y humedad relativa fueron extraídos de (Weather Atlas, n.d.).

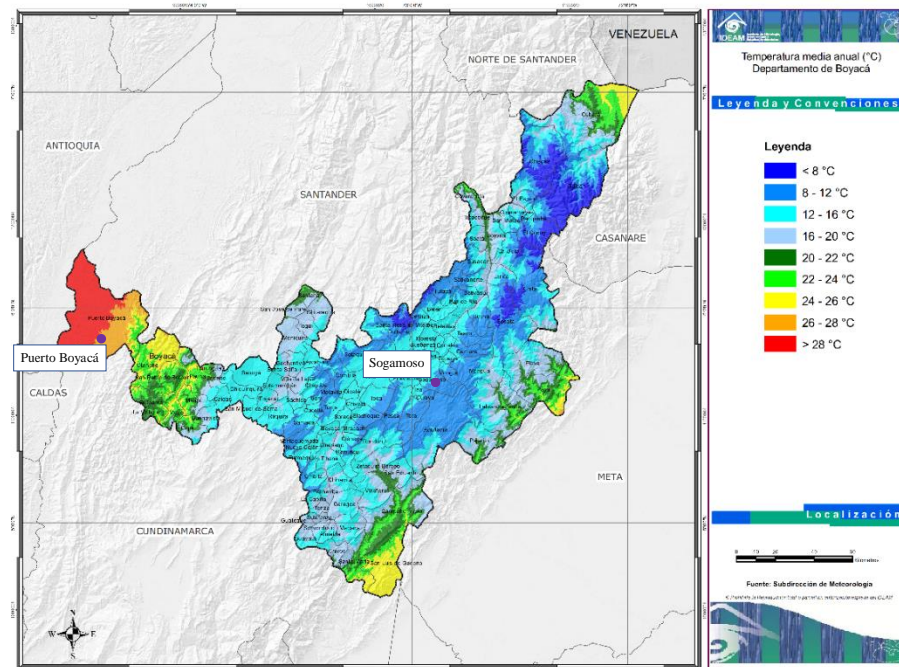


Figura 2 Temperatura media anual (°C) Departamento de Boyacá

Fuente: IDEAM (2010). Disponible en la web: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/temperatura-boyaca.pdf>

## Temperatura

**Sogamoso:** Se ubican dos temporadas a lo largo del año, la primera entre los meses de enero y abril con temperatura máximas promedio de 19°C, siendo el 25 de febrero el día más caluroso, con temperaturas entre los 19°C y 10°C, la segunda temporada se ubica entre los meses de junio y agosto, con temperaturas máximas promedio inferiores a 17°C, siendo el 21 de julio el día más frío del año, con temperaturas entre los 17°C y 9°C, en las madrugadas se pueden tener registros de temperaturas de hasta -4.8°C.

**Puerto Boyacá:** Tiene dos temporadas marcadas a lo largo del año, la etapa calurosa que se encuentra entre los meses de junio y agosto, con temperaturas promedio de 33°C siendo el 7 de agosto el día más caluroso del año con una temperatura máxima promedio de 34°C; la segunda temporada, que es la más fresca del año, se ubica entre los meses de octubre y diciembre con temperaturas máximas promedio de 32°C, siendo el 5 de enero el día más frío del año con una

temperatura mínima promedio de 24°C.

Estos dos entornos tienen una diferencia entre la temperatura promedio máxima y mínima diaria del aire a 2 metros sobre la tierra de 20°C, como se puede evidenciar en la Figura 3 *Temperatura máxima y mínima promedio en los municipios de Sogamoso y Puerto Boyacá a lo largo del año.*, lo que configura un gran reto a la hora de buscar la temperatura ideal al interior del invernadero para un correcto desarrollo fenológico del cultivo.

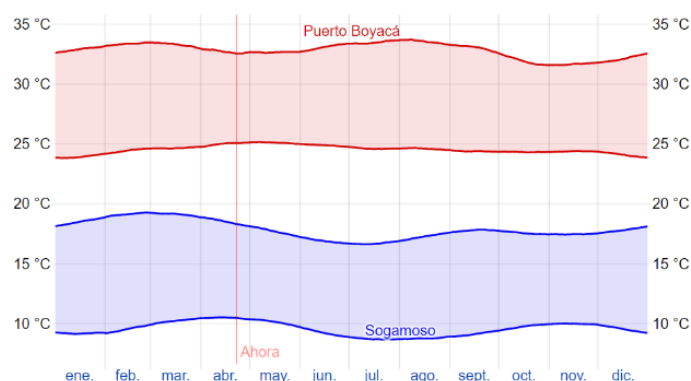


Figura 3 Temperatura máxima y mínima promedio en los municipios de Sogamoso y Puerto Boyacá a lo largo del año.

Fuente: WEATHERSPARK, (2016). Disponible en la web:

<https://es.weatherspark.com/compare/y/23389~25261/Comparaci%C3%B3n-del-tiempo-promedio-en-Puerto-Boyac%C3%A1-y-Sogamoso>. CC BY-NC-ND

## Humedad

**Sogamoso:** Los meses de abril y mayo contienen los mayores porcentajes de humedad relativa durante el año, con el 93% de HR, el mes de enero registra el porcentaje más bajo con 86%, este escenario arroja valores más altos de los aconsejados para el confort humano, establecido entre 50 – 60% de HR.

**Puerto Boyacá:** Tiene un período de alta humedad que dura diez meses, entre los meses de febrero y diciembre con un 72% de HR, siendo enero el mes menos húmedo del año con un nivel de 65% HR.

Según la Figura 4 Probabilidad de condiciones bochornosas, en la que se indica el porcentaje de tiempo en el que está bochornoso, opresivo o insoportable (es decir, un punto de rocío superior a 18°C), se deben contemplar estrategias que nivelen al interior del invernadero, los altos índices de humedad que se plantean en las dos escenas. .

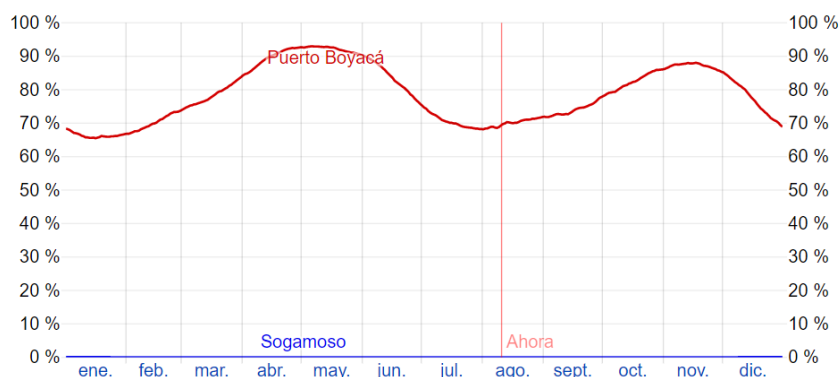


Figura 4 Probabilidad de condiciones bochornosas en Puerto Boyacá a lo largo del año.

Fuente: WEATHERSPARK, (2016). Disponible en la web:

<https://es.weatherspark.com/compare/y/23389~25261/Comparaci%C3%B3n-del-tiempo-promedio-en-Puerto-Boyac%C3%A1-y-Sogamoso>. CC BY-NC-ND

## Viento

**Sogamoso:** La primera temporada del año está marcada por vientos promedio de 7.0 Km/h entre los meses de enero y septiembre, siendo el 9 de julio el día más ventoso del año con una velocidad de 8.6 Km/h, la segunda temporada está comprendida entre los meses de septiembre y enero con velocidades promedio de 5,4 Km/h.

**Puerto Boyacá:** Se presenta una velocidad constante a lo largo del año con vientos promedio de 2.1 Km/h.

La información reflejada en la Figura 5 Velocidad promedio del viento, se debe analizar en conjunto con factores como temperatura y humedad descritos anteriormente, debido a que con ella es posible lograr la disminución de la temperatura interior del invernadero y evitar la sensación de bochorno; en el caso de Sogamoso es claro que existe una velocidad del viento óptima para

utilizar estrategias pasivas que ayuden a direccionar de forma correcta el aire en el espacio, para Puerto Boyacá, se deben contemplar estrategias que aumenten la velocidad del viento y así tener mayor número de renovaciones de aire, que permitan un control de temperatura y humedad interior.

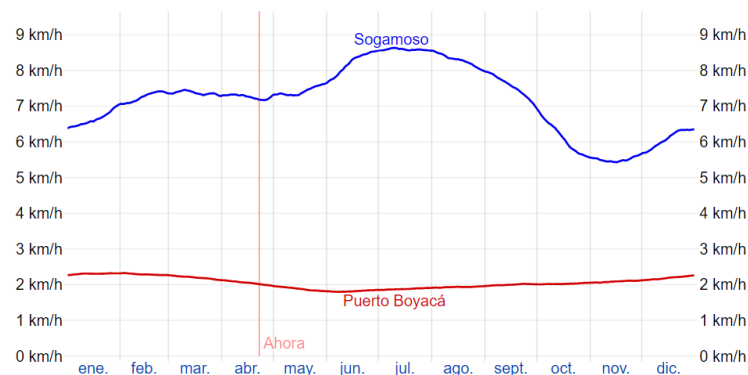


Figura 5 Velocidad promedio del viento

Fuente: WEATHERSPARK, (2016). Disponible en la web:

<https://es.weatherspark.com/compare/y/23389~25261/Comparaci%C3%B3n-del-tiempo-promedio-en-Puerto-Boyac%C3%A1-y-Sogamoso>. CC BY-NC-ND

## Precipitaciones

**Sogamoso:** La presencia de precipitaciones está directamente relacionada con las épocas más húmedas en el año, siendo abril el mes con mayores precipitaciones con 330mm, y enero con las más bajas con 96mm.

**Puerto Boyacá:** La temporada de lluvias dura ocho meses en el año, éstas se dan de marzo a diciembre, con probabilidades de lluvia por encima del 50%, y la temporada seca se presenta entre los meses de diciembre y marzo con probabilidades mínimas del 31%.

Como se evidencia en la Figura 6 Precipitación de lluvia mensual promedio, los dos entornos se rigen sobre las mismas épocas de lluvia, lo cual genera una situación térmica más compleja en el caso de Puerto Boyacá, esto debido a que se pueden presentar picos de humedad, que dificultan el hecho de poder mantener las condiciones térmicas correctas para el desarrollo fenológico del

cultivo.

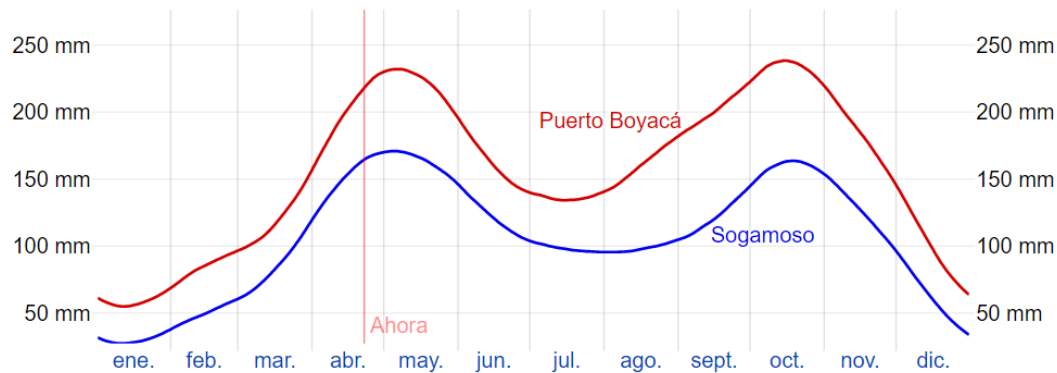


Figura 6 Precipitación de lluvia mensual promedio

Fuente: WEATHERSPARK, (2016). Disponible en la web:

<https://es.weatherspark.com/compare/y/23389~25261/Comparaci%C3%B3n-del-tiempo-promedio-en-Puerto-Boyac%C3%A1-y-Sogamoso>. CC BY-NC-ND

## Nubosidad

**Sogamoso:** Entre los meses de junio y septiembre se tienen los días más despejados del año con el 22% del tiempo parcialmente nublado, y el 78% nublado o mayormente nublado, los meses entre septiembre y junio tienen un índice del 93% de tiempo nublado o mayormente nublado, y únicamente el 7% del tiempo parcialmente nublado.

**Puerto Boyacá:** Se ubican dos temporadas a lo largo del año, entre diciembre y marzo están los meses más despejados con el 27% del tiempo parcialmente nublado y el 73% nublado, entre los meses de marzo a diciembre, se presentan porcentajes del 90% del tiempo nublado y únicamente el 10% del tiempo despejado o mayormente despejado.

Como se puede observar en la Figura 7 Probabilidad de cielo despejado, los dos contextos tienen una condición solar de cielos constantemente nublados, lo cual podría generar dificultades al intentar conseguir los estándares requeridos por el cultivo en cuanto a la radiación solar mínima requerida para tener un correcto proceso de fotosíntesis.



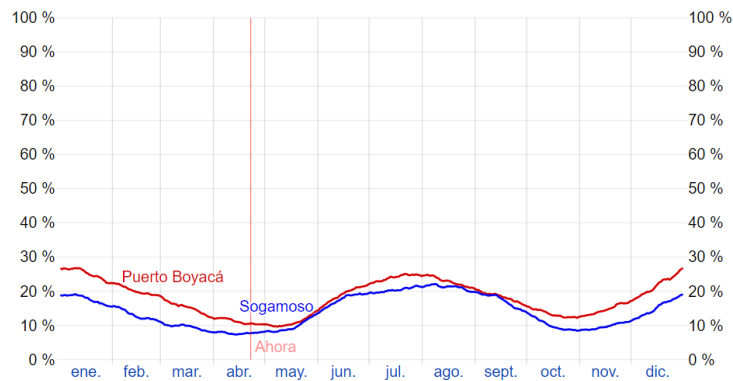


Figura 7 Probabilidad de cielo despejado

Fuente: WEATHERSPARK, (2016). Disponible en la web:

<https://es.weatherspark.com/compare/y/23389~25261/Comparaci%C3%B3n-del-tiempo-promedio-en-Puerto-Boyac%C3%A1-y-Sogamoso>. CC BY-NC-ND

## Marco Teórico/conceptual

### Invernadero

Según la Asociación Española de Normalización (UNE), (2020) en la norma UNE-EN-13031-1, define un invernadero como una estructura usada para el cultivo y/o protección de plantas y cosechas, la cual optimiza la transmisión de radiación solar bajo condiciones controladas para mejorar el entorno del cultivo y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de personas en su interior, viéndolo desde un ámbito proyectual, se puede entender como un elemento arquitectónico que debe responder a su contexto para lograr las características térmicas que requiere el cultivo, con la implementación de estrategias pasivas, para lograr diferentes propósitos:

En algunas regiones resulta más importante el efecto sombreo, en época de alta radiación, o el efecto cortavientos, al menos en ciertas épocas del año. El cerramiento de los invernaderos con malla en vez de con lámina plástica, de reciente introducción en latitudes bajas, limita la radiación y viento exteriores sin aumentar las temperaturas. En áreas muy áridas o desérticas, el aislamiento que aporta al invernadero respecto del medio exterior (muy seco y cálido) supone una concepción del cultivo protegido distinta de la convencional, al proporcionar una mejora

de la humedad ambiental y limitar el aumento de la temperatura, si el cultivo está bien regado. Ello ha inducido a hablar de un efecto oasis.(SIRJACOBS, 1988 citado por ROJAS CARDONA et al., 2017, p.26).

De igual forma no sólo se debe entender al invernadero desde sus beneficios térmicos, también se deben contemplar los beneficios económicos al tener una mayor productividad a lo largo del año como lo expresa Juárez Plata de la siguiente manera:

La principal ventaja de estas estructuras cerradas, es obtener condiciones artificiales de microclima para cultivar plantas fuera de estación en condiciones óptimas, que permiten alcanzar alta productividad, a bajo costo, en menos tiempo, sin daño ambiental, protegiéndose de las lluvias, granizo, heladas, insectos y excesos de viento que pudieran perjudicar al cultivo(2019, p.10).

### **Fenología**

La agencia estatal de meteorología (AEMET) de España define la fenología como:

Ciencia que estudia los fenómenos biológicos como por ejemplo los ciclos biológicos de plantas anuales e insectos, los cambios observados en el desarrollo de árboles y arbustos, las migraciones de las aves, etc.; que se presentan periódicamente acomodados a ritmos estacionales y que tienen relación con el clima y con el curso anual del tiempo atmosférico en un determinado lugar.(2019)

Luego de tener claro el concepto de fenología, se toma como referencia la escala BBCH la cual se entiende como “un sistema para una codificación uniforme de identificación fenológica de estadios de crecimiento para todas las especies de plantas mono - y dicotiledóneas”(1996, p.1), en el que se muestra todo el proceso de fenología de la arveja pasando por ocho diferentes estadios de desarrollo:

Estadio	Descripción
0	Germinación
1	Desarrollo de las hojas
3	Crecimiento longitudinal
5	Aparición del órgano floral
6	Floración
7	Formación del fruto
8	Maduración de frutos y semillas
9	Senescencia

Tabla 1 Estadios de desarrollo de la arveja (*Pisum sativum* L.)

Fuente: Elaboración propia, información extraída de BBCH, (1996, p.106). CC BY-NC-ND

Los estadios dos y cuatro hacen referencia a la formación de brotes laterales y desarrollo de las partes vegetativas cosechables de la planta respectivamente, estos no se encuentran en la Tabla 1, debido a que no aplica para este tipo de cultivo.

### **Diseño pasivo**

El diseño pasivo comprende una combinación de estrategias y acciones direccionadas a mantener el confort térmico de un elemento arquitectónico, como lo expresa Coronado Hernández (2017, p.34) es:

EL aprovechamiento, utilización y manejo de los elementos característicos del entorno inmediato y de los factores variables del clima como son la iluminación y ventilación natural y la energía solar. La arquitectura pasiva busca adaptarse al contexto climático, por lo que sus estrategias deben responder a las condiciones de humedad, radiación solar, precipitaciones,

temperatura, vientos (dirección, frecuencia y velocidad), y características topográficas

Dentro de las estrategias más comunes encontramos las descritas por Herrero domínguez (2020, p.28):

A. Orientación

- Impacto de la radiación solar sobre envolvente.
- Impacto de vientos sobre envolvente.

B. Compacidad

C. Protección solar

- Elementos generadores de sombra.
- Reflectividad solar.

D. Calidad de la envolvente térmica

- Aislamiento térmico.
- Inercia térmica.
- Puentes térmicos.

E. Hermeticidad al paso del aire

F. Aspectos relacionados con la ventilación

- Ventilación natural.
- Ventilación híbrida.
- Ventilación mecánica o controlada de doble flujo.

G. Aspectos singulares selectivos

- Torre de viento.
- Chimenea solar.

- Muro Trombe.

### **Diseño paramétrico**

Para lograr dimensionar el alcance del diseño paramétrico, se debe comprender primero el concepto de parámetro, expresado por Navarrete (2014, p.65) como “un dato que es tomado como necesario para analizar o valorar una situación. A partir del parámetro, una determinada circunstancia puede entenderse o situarse en perspectiva”, de igual manera estos patrones deben cumplir con algunos lineamientos básicos para lograr generar una metodología de forma correcta, Navarrete (2014, p.69) en su trabajo expone:

- Diseñar un proceso y no un resultado concreto: Al diseñar un proceso se desarrollan relaciones matemáticas y geométricas, como resultado, procesos y sistemas (algoritmos), los cuales permiten explorar más de un resultado, con ciertas premisas de diseño establecidas previamente.
- Posibilidad de relacionar variables / parámetros: Teniendo un proceso de diseño y no una forma preestablecida se pueden manipular sus variables y propiedades, las cuales se pueden modificar en tiempo real y así comparar resultados, con la finalidad de tener un producto final más eficiente.
- Resultados paramétricos y /o responsivos a condiciones establecidas previamente: A partir del diseño paramétrico se puede generar diseños inteligentes y/o responsivos estableciendo un criterio de diseño (exploración de formas), permitiendo adaptarse a cualquier situación, contexto, tectónico, etc. Es decir, se puede adaptar el diseño a cualquier parámetro o variable que sea, integrado al proceso de diseño, obteniendo un resultado inteligente y responsivo que logra satisfacer un problema específico.

De acuerdo con lo anterior, se puede extrapolar el concepto de parámetro a la arquitectura, con el fin de desarrollar proyectos pensados desde el proceso más que desde el resultado final como lo expresa Morales Pacheco (2012, p.1), “la parte sustancial de un diseño paramétrico recae en el proceso, más que en algo tangible o virtual al cual podemos llegar.” “Tal diseño será el resultado de una experimentación de prueba y error, con esto lograremos el diseño que más se acerque a esa idea que nos formulamos en el imaginario desde un inicio”, por otro lado, el paradigma de utilizar las herramientas computacionales como los tipos de software para dibujar y convertirlos en un medio de diseño que nos ayude a crear miles de posibilidades, diseños basados en aspectos cualitativos, sin dejar a un lado el rol del arquitecto, como lo explica Navarrete (2014, p.64)“el diseñador comienza por establecer las relaciones entre las partes, construye su diseño a partir de estas relaciones y modifica estas relaciones a partir de la evaluación y selección de los resultados obtenidos.”

### **Árbol de decisión**

El árbol de decisión se pueden entender como “una técnica estadística para la segmentación, la estratificación, la predicción, la reducción de datos y el filtrado de variables, la identificación de interacciones, la fusión de categorías y la discretización de variables continuas.”(Berlanga Silvente et al., 2013, p.1), con éste, se puede representar el proceso de diseño paramétrico de una forma gráfica y sintetizada, y que puede servir como un instrumento de diseño.

Se debe tener en cuenta la simbología correcta con la que se debe representar cada uno de los nodos que componen el árbol de decisión, en la página Lucidchart (2021) identifican los siguientes símbolos de representación:

**Nodo de decisión:** Indica una decisión que se tomará.



Figura 8 Nodo de decisión

Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC BY-NC-ND

**Nodo de probabilidad:** Muestra múltiples resultados inciertos.

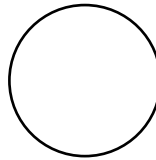


Figura 9. Nodo de probabilidad

Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC BY-NC-ND

**Ramificaciones alternativas:** Cada ramificación indica un posible resultado o acción.

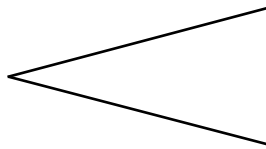


Figura 10. Ramificaciones alternativas

Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC BY-NC-ND

**Alternativa rechazada:** Muestra una alternativa que no estaba seleccionada.

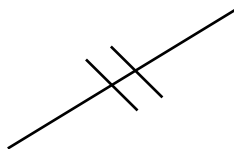


Figura 11 Alternativa rechazada

Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC BY-NC-ND

**Nodo terminal:** Indica un resultado definitivo.

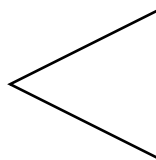


Figura 12. Nodo terminal

Fuente: Elaboración propia, información extraída de Lucidchart (2021) CC BY-NC-ND

## **Variable**

Según Castillero Mimenza (n.d.) una variable se puede entender como un constructo abstracto que hace referencia a una propiedad, característica o elemento estudiado y que se presenta de tal manera que puede poseer distintos valores. Para el caso práctico de esta investigación se buscará la relación entre las variables y la escala de las mismas, Buendía Eisman et al., (1998) las clasifica de la siguiente forma:

Relación entre variables:

- Independientes
- Dependientes
- Moderadoras
- Extrañas

Escala entre variables:

- Nominal
- Ordinal
- De intervalo
- De razón

Cabe resaltar que tener claro estos criterios de variables, es de suma importancia para lograr generar unos mapas de decisión correctos en los que sea clara la relación entre las variables a utilizar, y el orden en las que se deben situar.



## **Marco Legal**

Según la circular externa expedida por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2004, p.1), dirigida a los alcaldes municipales y distritales, secretarios de planeación y curadores urbanos, refiriéndose a la clasificación de los invernaderos dentro de la normativa expresa que:

Según el numeral 14 del artículo 4 de la Ley 400 de 1997 se define como edificación a la construcción cuyo uso primordial es la habitación u ocupación por seres humanos. Agrega la misma Ley 400/97 que todas las edificaciones convencionales que se adelanten en el territorio nacional deberán sujetarse a las normas vigentes de sismo resistencia.

Por otra parte, la instalación de toldos, cobertizos, carpas o similares que están soportados y armados con plásticos u otros materiales livianos que son fácilmente instalados o desmontados en cualquier espacio sin generar ningún tipo de detrimento en el terreno, que pueden actuar como invernaderos y que tienen como función básica proteger los cultivos, áreas o espacios de las inclemencias del clima; no se pueden clasificar como edificaciones, sino como una técnica de cultivo o de protección, que generalmente es utilizada para la siembra a cielo abierto o para otras actividades al aire libre y, en consecuencia, no ameritan la exigencia de una licencia de construcción.

En consecuencia, con lo anteriormente expuesto se determina que el módulo de invernadero no clasifica dentro de la definición de edificación, razón por la que queda exento del cumplimiento de las normativas que rigen esta categoría, no obstante, se debe asegurar el cumplimiento de todos los requerimientos técnicos que tenga el cultivo para su correcto desarrollo.

## **Estado del arte**

Dentro de las investigaciones realizadas en torno al diseño y análisis del control climático en invernaderos, se encuentran diferentes metodologías y aspectos a abarcar en los últimos años, que intentan generar una visión lineal de los trabajos referenciados, se abordarán de forma cronológica, con el fin de entender el proceso y los avances generados dentro de esta temática. A inicios de siglo se pueden evidenciar varias publicaciones enfocadas al control climático de cultivos en invernadero como lo expresan Martínez et al., (2002, p.29) determinando que:

El control climático del invernadero es un arma de enorme eficacia para la prevención de enfermedades y plagas de los cultivos, y que facilita y aumenta de manera clara, las posibilidades de aplicar programas de lucha integrada. Los avances en la tecnología de los sensores, actuadores, autómatas programables y de los ordenadores, cada vez más precisos y baratos favorecen, sin lugar a duda, esta evolución de los agricultores.

Se establece así un precedente sobre el beneficio de la aplicación de control climático de invernaderos en cultivos, de igual forma Martínez et al., (2002, p.31-37) expresa la relación que tiene la fotosíntesis con la luz, el CO<sub>2</sub>, y la temperatura del aire, y recopila los parámetros climáticos más influyentes en los cultivos bajo invernadero como:

- Radiación solar
- Temperatura
- Anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>)
- Humedad del aire
- Fotosíntesis y luz
- Fotosíntesis y CO<sub>2</sub>

- Fotosíntesis y temperatura del aire
- Transpiración
- Aireación
- Sombreo

Gracias a esta investigación, se entiende la relación que existe entre las condiciones ambientales que necesitan los cultivos para tener un óptimo desarrollo fenológico, es importante mencionar que dicha investigación también enfoca su estudio en equipos de regulación del clima a través de sistemas de calefacción y humidificación entre otros, dejando de lado las estrategias pasivas que buscan generar el menor impacto ambiental posible.

En el contexto local Diaz Sarmiento & Solano Rojas (2006, p.17) demarcan cuatro factores ambientales: “temperatura, humedad relativa, luz y CO<sub>2</sub>” que influyen directamente en el desarrollo del proyecto, de igual manera enfatizan en el bajo desarrollo de la infraestructura a nivel nacional exponiendo que “la infraestructura en invernaderos casi no ha cambiado desde el punto de vista de la climatización: Los invernaderos Colombianos son de bajo costo comparados con la infraestructura en otras latitudes, pero no ofrecen un control climático.”(2006, p.21), acto que da cabida a la necesidad de investigación sobre estas temáticas.

Adicionalmente Diaz Sarmiento & Solano Rojas (2006, p.24) recopilan información acerca de las ventajas y desventajas que presentan diferentes tipologías de invernadero, información que permite determinar cuál de ellas, puede incluirse en la presente metodología de diseño:

<b>Tipo de invernadero</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Plano</b>	Su económica construcción. Mayor resistencia al viento. Presenta uniformidad luminosa. Adaptabilidad a la geometría.	Mala ventilación. Instalación de ventanas es difícil. Rápido envejecimiento. Nada recomendable en lugares lluviosos.
<b>En raspa</b>	Su economía. Gran temperatura nocturna. Permite ventilación cenital.	La luminosa no es uniforme. No se aprovecha las aguas pluviales. Difícil cambio de cubiertas. Pierde fácilmente temperatura.
<b>Asimétrico</b>	Aprovecha muy bien la luz. Elevada inercia térmica. Buena ventilación. Permite ventilación cenital.	No se aprovecha las aguas pluviales. Difícil cambio de cubiertas. Pierde fácilmente temperatura.
<b>Capilla</b>	Fácil construcción. Fácil montaje de la cubierta. Permite ventilación vertical. Facilidades de evacuar agua. Permite unir varias naves.	Si la inclinación de los planos es menor a 25°C dificulta la evacuación de agua pluvial.
<b>Doble capilla</b>	Buena ventilación. Permite ventilación mixta.	Costoso. Difícil construcción. Pocos invernaderos de este tipo.
<b>Túnel</b>	Buena ventilación. Estanqueidad de lluvia y aire. Permite ventilación cenital. Buena luminosidad.	Elevado costo. No se aprovecha las aguas pluviales.
<b>De cristal</b>	Facilita el controlar de clima.	Su elevado costo. Naves pequeñas debido a la complejidad.

Tabla 2 Ventajas y desventajas de diferentes tipologías de invernadero

Fuente: (Díaz Sarmiento & Solano Rojas, 2006, p.24) CC BY-NC-ND

Por otra parte, Díaz Sarmiento & Solano Rojas (2006,) implementan mapas de decisión para sus resultados, con el fin de asociar aspectos físicos del invernadero, con el control térmico de la siguiente manera:

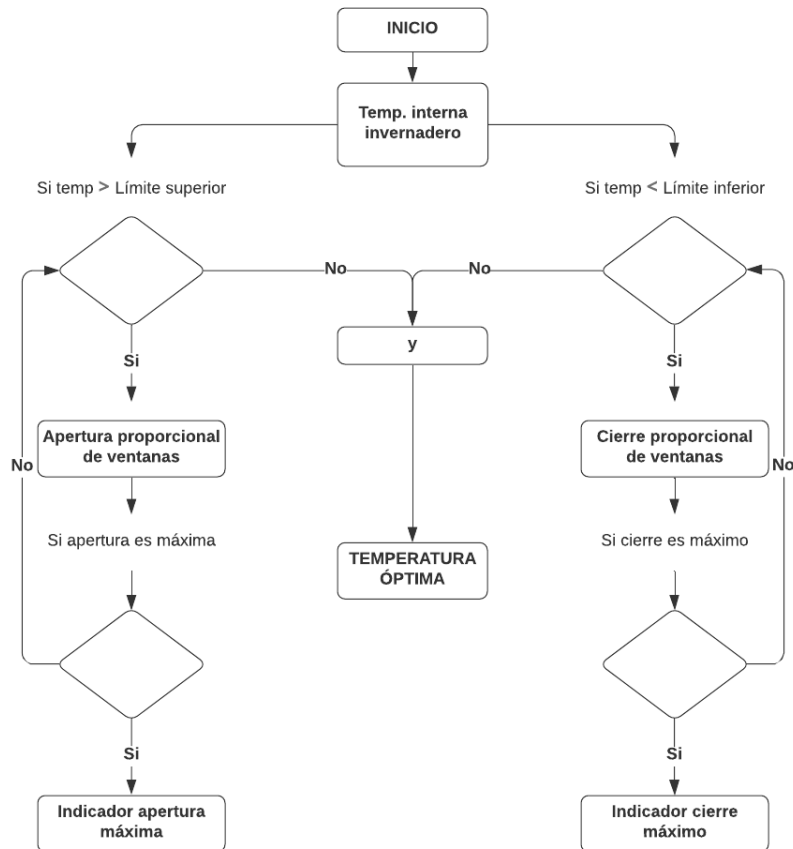


Figura 13 Control general de temperatura

Fuente: (Díaz Sarmiento & Solano Rojas, 2006, p.111) CC BY-NC-ND

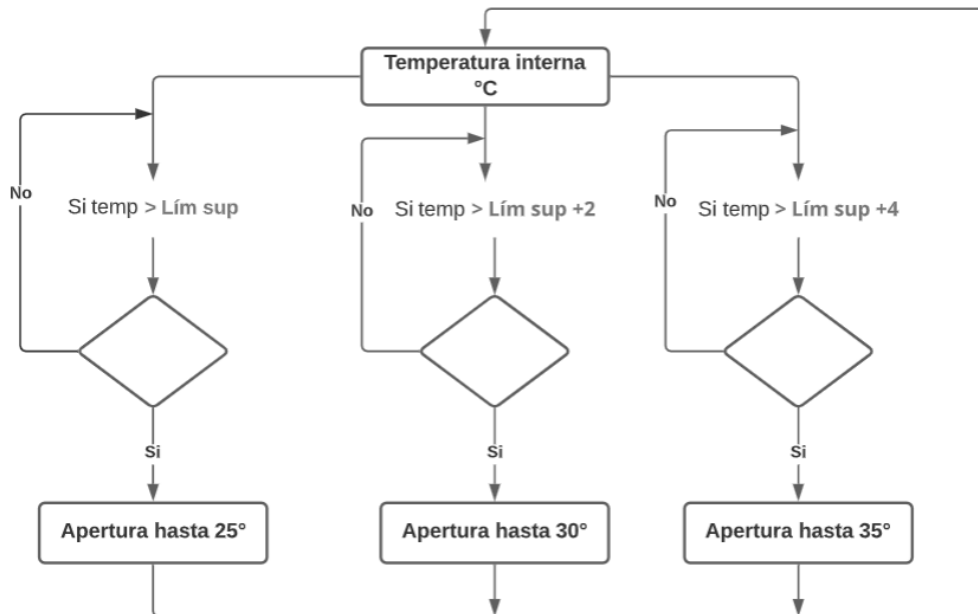


Figura 14 Control de apertura de ventanas.

Fuente: (Díaz Sarmiento & Solano Rojas, 2006, p.112) CC BY-NC-ND

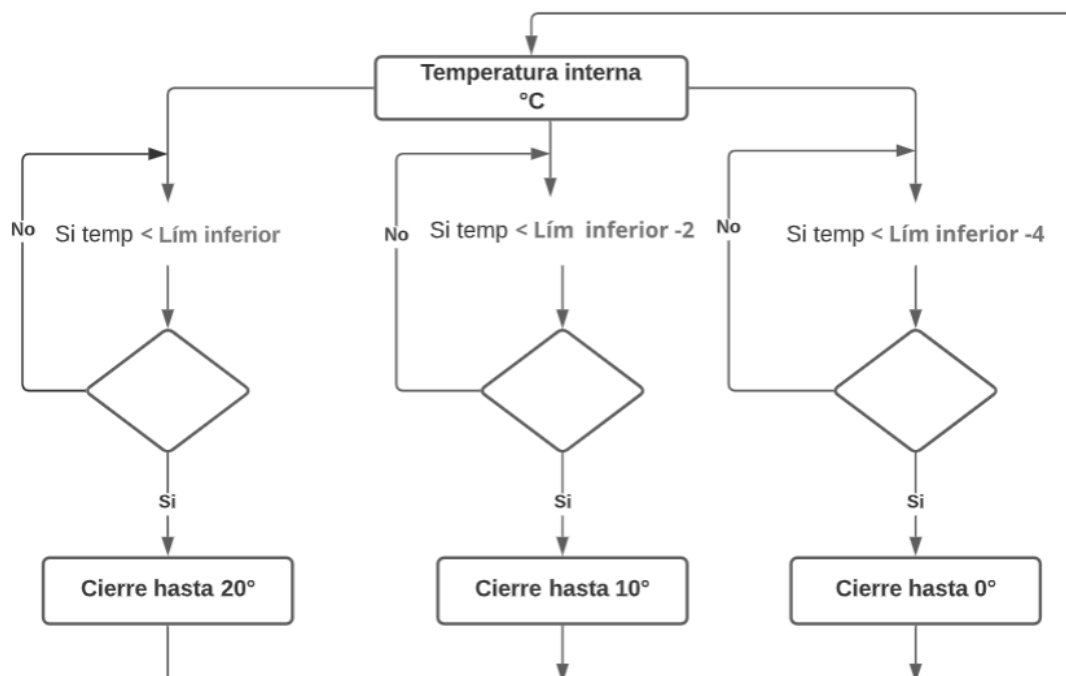


Figura 15 Control cierra de ventanas  
Fuente: (Díaz Sarmiento & Solano Rojas, 2006, p.112) CC BY-NC-ND

Es importante afirmar que la investigación únicamente se centró en aspectos de temperatura interna del invernadero, dejando de lado las demás variables que influyen en el cultivo. Además, el estudio se llevó a cabo en una única tipología de invernadero, planteamiento que no permite evidenciar sus resultados bajo otra categoría de invernadero, ni bajo el resto de variables que pueden afectar al cultivo.

En la discusión sobre la conexión que existe entre la aplicación de alta tecnología en invernaderos, y el rendimiento de los cultivos, Pedro Florián Martínez & Roca (2011, p.181) expresan que “mayor inversión no implica mayor rentabilidad.” Enunciado que refuerza la idea de que implementar estrategias pasivas de bajo costo, lograría dar un balance costo eficiente en el cultivo, circunstancia que beneficiaría a los cultivadores, ya que podrían ser competitivos en el mercado, sin necesidad de hacer grandes inversiones.

De igual manera Florián Martínez & Roca (2011, p.192) exponen y analizan interesantes estrategias pasivas enfocadas a temperaturas bajas, por medio de materiales utilizados en cubierta para lograr la mayor cantidad de radiación solar al interior, contribuyendo tanto a la fotosíntesis, como a la temperatura interna, aconsejan además utilizar materiales de baja transmisión de la radiación infrarroja larga (IRL), como el polietileno térmico.

Además Florián Martínez & Roca (2011, p.192), describen las pérdidas térmicas que se pueden generar en los invernaderos al colocar cubiertas dobles o sencillas, pese a la baja radiación que se puede generar al aplicar cubiertas dobles, se evidencian saltos térmicos de 2°C a 3°C en noches normales, y en noches heladas de 5°C al interior del invernadero, aportando al estudio datos cuantitativos de apoyo sobre materiales usados y sus cualidades térmicas; asimismo la investigación carece de comparativa entre diferentes tipos de invernaderos y soluciones aplicadas para lograr condiciones adecuadas.

Por otra parte Flores Velázquez et al., (2014, p.131) en su trabajo sobre la evaluación del desempeño climático de un invernadero basado en dinámica de fluidos computacionales (CFD) afirma que “La ventilación natural eficiente es un método efectivo para controlar el clima” convirtiéndolo en uno de los factores más importantes a aplicar en la metodología del trabajo, debido a que por medio de la ventilación se pueden controlar diferentes variables simultáneamente.

Los resultados obtenidos por Flores Velázquez et al., (2014, p.131) resaltan que se pueden obtener “diferencias sustantivas en el flujo de aire debido a la orientación de la apertura de las ventanas” dando relevancia a que con pequeños cambios en la forma de las aperturas y sus características se obtienen grandes ganancias al interior del invernadero, además logran concluir que “las ventanas cenitales incrementan el intercambio de aire y en consecuencia homogeniza la

distribución espacial térmica.” afirmación que da luz verde sobre los resultados de este tipo de estrategias pasivas, sobre los beneficios obtenidos en la investigación con aplicación de análisis CFD, ya que “permite una visión global de la distribución espacial del viento en el interior del invernadero y con ello inferir sus características climáticas.” (Flores Velázquez et al., 2014).

Respecto a la simulación de parámetros en el software DesignBuilder®, Alvarez Sánchez et al., (2014) generaron un modelo de invernadero en el cual comparan tres diferentes configuraciones de envolvente, para equiparar el comportamiento de las ganancias internas, simulando primero un módulo en bambú y policarbonato, luego un módulo con las mismas características pero incluyendo un control climático para mantener temperaturas entre los 22 y 26°C, y por ultimo un módulo con muros en concreto con una altura de 1.5m y el resto de la reestructura planteada en policarbonato.

Dando cabida a análisis comparativos de diferentes materiales aplicados en una sola morfología, Alvarez Sánchez et al., (2014, p.158) concluyen de los resultados obtenidos que “demuestran la utilidad de la construcción virtual de invernaderos utilizando software especializado para analizar la interacción entre las condiciones climáticas internas y externas.”; adicionalmente expresan la necesidad de utilizar una mayor cantidad de variables dentro del diagnóstico, tales como la humedad, infiltraciones y cargas térmicas del suelo y cultivo, que podrían ayudar a lograr resultados más concluyentes.

En busca de encontrar un estudio que se genere de forma local y que avale la veracidad de los resultados computacionales vs el comportamiento térmico real de un invernadero, se destaca un estudio, el cual consiste en evaluar el comportamiento térmico de un invernadero ubicado en la sabana de Bogotá por medio de simulaciones CFD en condiciones de clima diurno y nocturno,



para este caso, se recolectaron y compararon los datos obtenidos en la simulación CFD, respecto a la evidencia adquirida en campo, lo que arrojó como efecto un grado de ajuste adecuado, y las mismas tendencias.

En este estudio Villagrán Munar & Bojacá Aldana (2019, p.9) concluyen que “el modelo CFD es fiable para desarrollar simulaciones numéricas y puede ser usado para evaluar el comportamiento térmico de otra tipología de invernaderos bajo las mismas condiciones meteorológicas.”.

Debido a que una de las localizaciones de estudio del trabajo actual de investigación se sitúa en la sabana cundiboyacense, lugar donde se realizó el anterior diagnóstico, se puede inferir que los datos resultantes de las simulaciones pueden ser muy próximos a los que se experimentan en el invernadero de forma real.

### **Diseño metodológico**

La presente metodología se basa en la búsqueda de poder desarrollar un diseño paramétrico a partir de la interacción de variables físicas y climáticas, que logren desde el método cuantitativo, el escenario propicio para un correcto desarrollo fenológico por parte del cultivo de arveja en los contextos de Sogamoso y Puerto Boyacá.

Por medio del software DesignBuilder se modelarán diferentes variables generadas desde el proceso de investigación de tipo experimental, en el cual se tiene una línea base climática suscitada por los contextos en los que se ubicarán los invernaderos y la zona de confort climático dada por el cultivo de arveja, se plantea llegar a ella por medio de estrategias arquitectónicas pasivas, para tener como resultado un árbol de soluciones que condensen las variables aplicadas en las simulaciones, llegando a diferentes escenarios propicios para lograr un correcto desarrollo

del cultivo.

## **Fases Metodológicas**

### **Fase I: Búsqueda y recolección de información**

Se comprende en primera instancia, de la búsqueda y recolección de información climática de Sogamoso y Puerto Boyacá a través de Meteonorm 8, y procesadas por medio de Weather Tool, así como de la estandarización de las condiciones térmicas que requiere el cultivo para su correcto desarrollo fenológico, los tipos de invernadero que se evaluarán y, por último, las estrategias pasivas a implementar.

Es importante tener en cuenta que las variables climáticas del contexto se entienden como: radiación e incidencia solar, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, dirección, y velocidad del viento a lo largo del año. En cuanto a las variables bioclimáticas requeridas por el cultivo, están los rangos máximos y mínimos de temperatura, humedad e iluminación y finalmente, las variables físicas, que contemplan las formas y dimensiones de los invernaderos.

### **Fase II: Definición de variables y estructuración del árbol de decisiones**

En esta fase se genera un análisis de vinculación entre variables climáticas y físicas, así como su posible correlación a la hora de buscar las condiciones ambientales requeridas por el cultivo, con el fin de obtener un primer árbol de decisiones estructurado a partir del orden jerárquico de variables.

Este primer árbol de decisiones permite el cumplimiento de dos objetivos, el primero, organizar y mostrar la metodología de diseño propuesta, el segundo, mostrar un panorama general del proceso en busca de conseguir las mejores combinaciones de estrategias pasivas, para lograr las condiciones ambientales adecuadas del cultivo de arveja.

### **Fase III: Simulación computarizada y análisis de resultados**

A partir del orden planteado en el esquema primario del árbol de decisiones definido en la fase II, se generan las simulaciones computarizadas en DesignBuilder.

Los datos obtenidos de las simulaciones se recopilan y se analizan, eligiendo en cada ronda de simulaciones las variables que más se aproximen al resultado esperado, para así lograr diferentes combinaciones de variables que den como resultado la temperatura y humedad más próximas al rango requerido por el cultivo, consiguiendo de esta manera estructurar el árbol de decisiones final.

### **Fase IV: Estructuración de la metodología de diseño a partir de resultados obtenidos**

Para esta última fase, se generan los árboles de decisión finales, correspondientes a cada uno de los contextos, en esta etapa, se muestran únicamente los resultados positivos obtenidos, ganando con esto una herramienta que permite después de un proceso de simulaciones computarizadas y análisis de resultados, escoger en cada uno de los contextos, las combinaciones de estrategias pasivas adecuadas para alcanzar las condiciones ambientales pertinentes para un correcto desarrollo fenológico de un cultivo de arveja.

## **Desarrollo de metodología de diseño paramétrico**

En este capítulo se presenta el desarrollo de las cuatro fases metodológicas anteriormente expuestas, se genera el desarrollo de cada una de ellas, expresando y resolviendo cada propósito, con un orden de trabajo claro y un único fin, lograr una solución de diseño paramétrico para los invernaderos a través de un árbol de decisiones que sea de gran utilidad para campesinos y agrónomos que requieran generar este tipo de cultivo bajo invernadero en los contextos analizados.

### **Fase I: Búsqueda y recolección de información**

A continuación, se expresan las variables climáticas de Sogamoso y Puerto Boyacá, las condiciones ambientales requeridas para el correcto desarrollo del cultivo de arveja, los tipos de invernadero a evaluar y las estrategias pasivas a implementar.

### **Variables climáticas**

Las variables climáticas contextuales son extraídas por medio del programa Meteonorm e interpretadas por Weather Tool, lo cual permite una visualización y análisis completo de datos climáticos, en los horarios de los contextos en estudio. Las variables térmicas del cultivo comprenden los rangos de temperatura, humedad e iluminación requeridos para un correcto desarrollo fenológico del cultivo.

## Variables contextuales: Sogamoso

### - Temperatura:

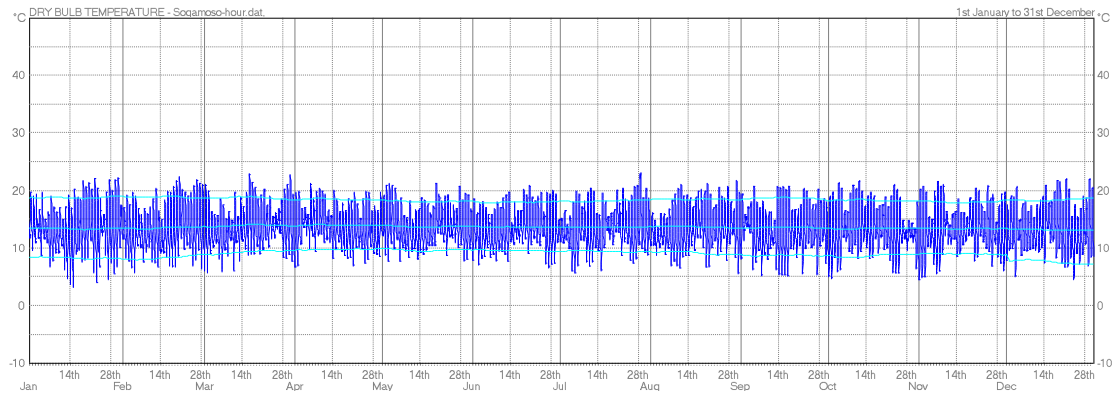


Figura 16 Temperatura de bulbo seco, Sogamoso

Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

En la Figura 16 se evidencia el comportamiento térmico con rangos de temperatura máximas medias de 20.78°C, temperatura promedio de 13.6°C y temperaturas bajas medias de 6°C. El día más cálido del año es el 29 de julio con una temperatura máxima de 23°C y altos porcentajes de humedad en la madrugada, como lo muestra la Figura 17; y el día más frío del año es el 16 de enero reflejado en la Figura 18 con una temperatura mínima de 4°C y altos porcentajes de humedad tanto en la noche como en la madrugada.

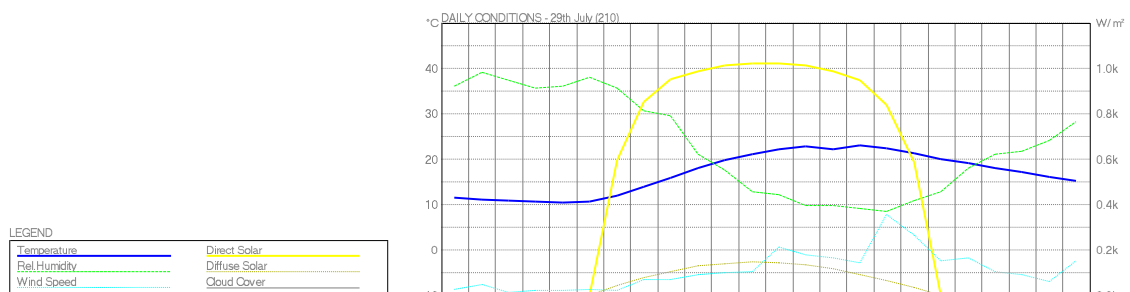


Figura 17 Día más cálido del año – 29 de julio, Sogamoso

Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

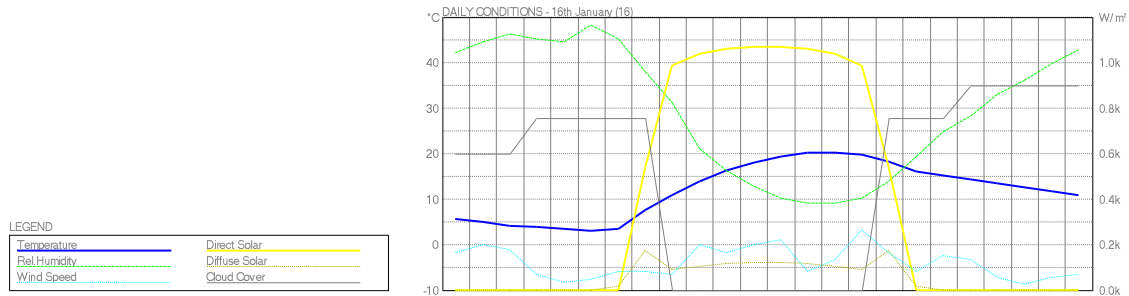


Figura 18 Día más frío del año – 16 de enero, Sogamoso  
Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

Lo anterior demuestra que Sogamoso se encuentra en un clima frío con temperaturas bajas en la noche y un alto porcentaje de humedad; lo cual genera las condiciones idóneas para que los cultivos de cielo abierto sufran heladas, por ende, se debe tomar como punto de partida el día más frío para simular y evaluar las estrategias a emplear en busca del rango ideal para el cultivo.

#### - **Humedad relativa:**

En lo que respecta a la humedad relativa a lo largo del año, se presenta en porcentajes promedios de 89.58% en la mañana y en la tarde de 59.25%, porcentajes altos frente al rango de confort humano que esta entre el 40% y 60%.

En la Figura 19 se manifiesta el comportamiento promedio de humedad relativa a lo largo del año, variando entre el 70% y el 80%; con valores máximos promedio entre 90% y 100% y valores mínimos promedio de 50% y 60%.

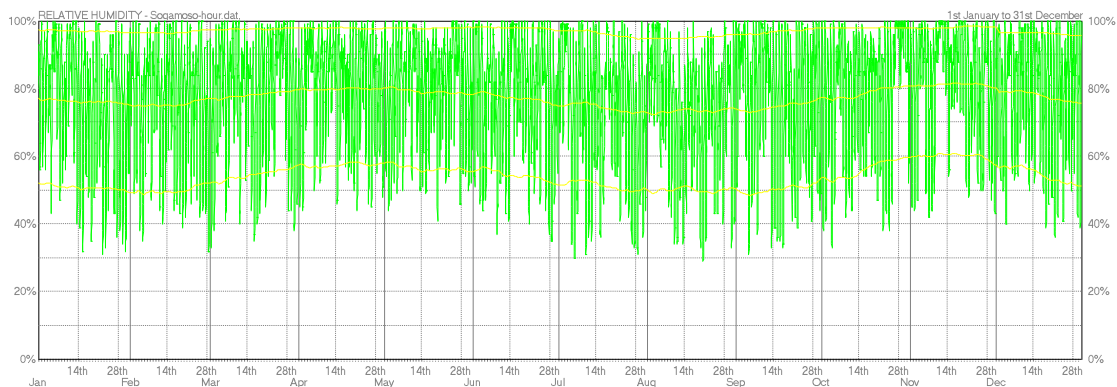


Figura 19 Humedad relativa, Sogamoso

Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

Según los valores descritos anteriormente, se evidencia que los altos porcentajes de humedad relativa en Sogamoso, son un factor climático que se debe controlar al interior del invernadero para evitar que se vea afectado.

#### - **Posición solar:**

Durante el año, el ángulo y la posición del sol varía constantemente teniendo cuatro puntos de referencia: el equinoccio de primavera el 21 de marzo, solsticio de verano el 21 de junio, equinoccio de otoño el 23 de septiembre y el solsticio de invierno el 22 de diciembre. Al ubicar el invernadero en Sogamoso se demuestra a través del diagrama estereográfico (Figura 20) contrastado con la temperatura promedio, que la cara oriental del invernadero tendrá a lo largo del año temperaturas más bajas que la cara occidental, además como lo representa la proyección ortográfica (Figura 21) a partir de las 9am se generará un ascenso de la temperatura del lugar, lo que arroja un promedio anual de irradiación de  $739.71 \text{ Wh/m}^2$ .

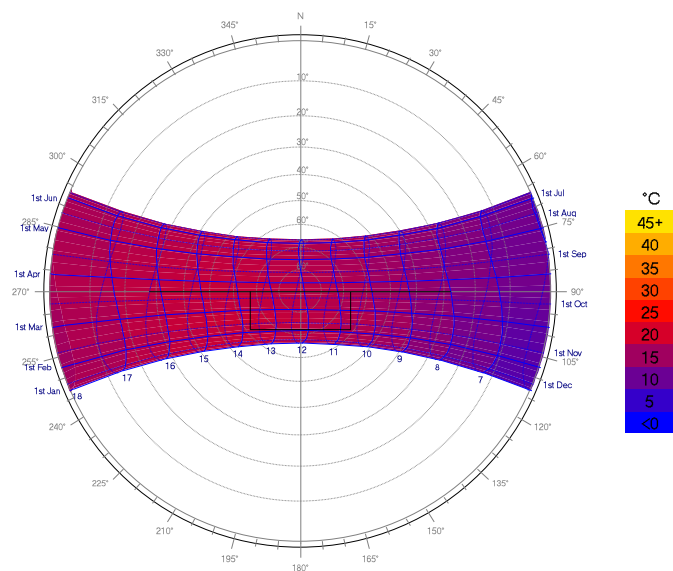


Figura 20 Diagrama estereográfico – Temperatura promedio, Sogamoso  
Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

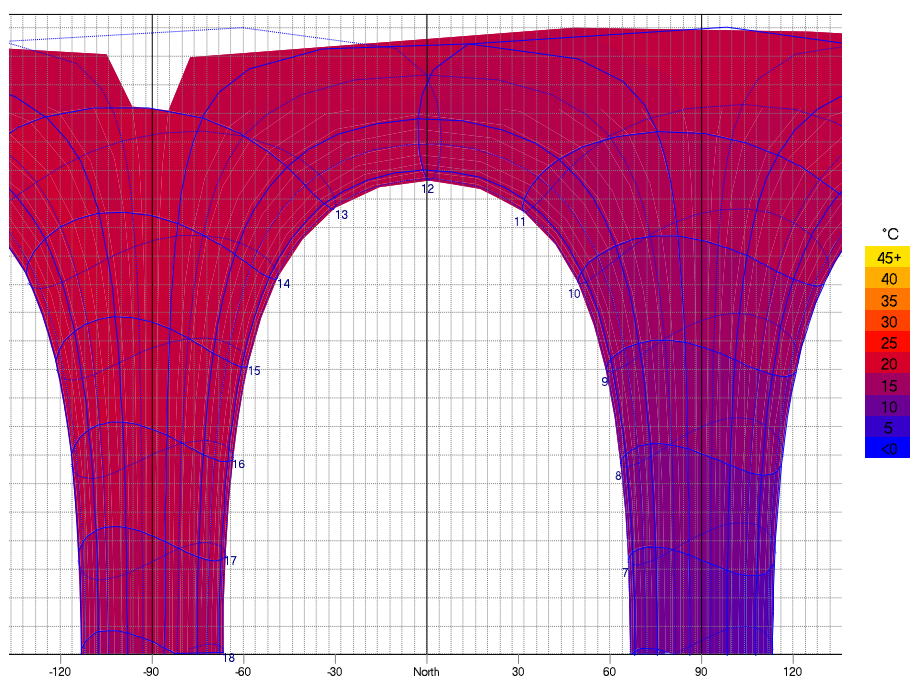


Figura 21 Proyección ortográfica – Temperatura promedio, Sogamoso  
Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND



Es necesario aclarar que se debe captar la mayor cantidad de radiación solar diaria para tener temperaturas interiores más altas, por esta razón, se debe orientar el volumen con las caras más largas sobre el oriente y occidente, así como muestra la Figura 22.

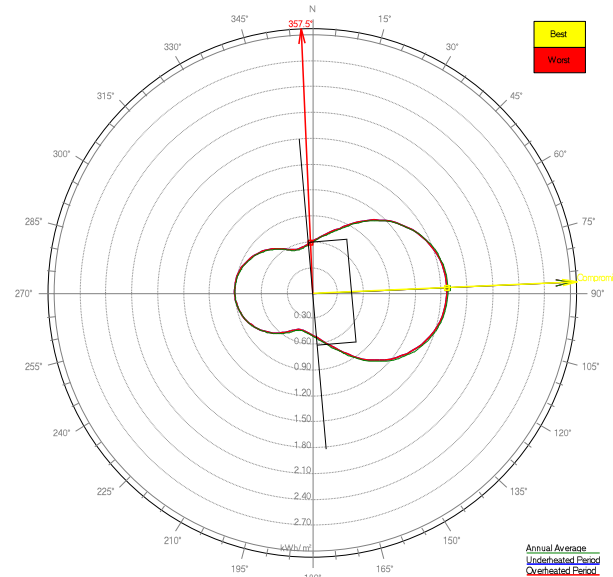


Figura 22 Orientación óptima invernadero, Sogamoso

Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

#### - Viento:

A lo largo del año la dirección predominante del viento es de oriente a occidente con velocidades entre 5Km/h y 20Km/h durante más de 728 horas al año.

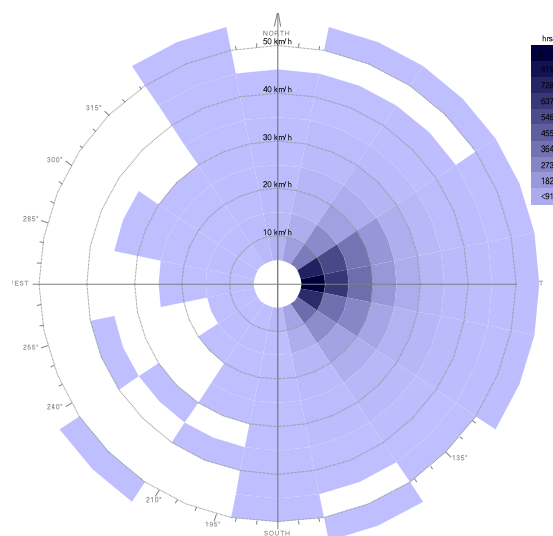


Figura 23 Dirección, duración y velocidad del viento anual, Sogamoso

Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

En el diseño del invernadero se debe contemplar esta variable para lograr una correcta circulación del aire interior, aprovechando la dirección del viento.

- **Precipitaciones:**

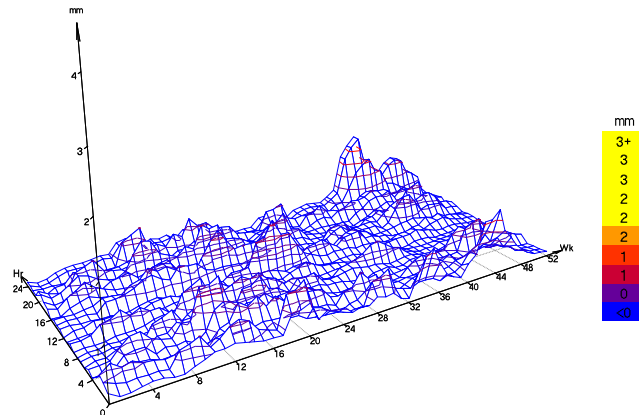


Figura 24 precipitaciones anuales, Sogamoso

Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

Las precipitaciones evidenciadas en Sogamoso no presentan ningún reto o problema sobre el diseño del invernadero a lo largo del año, con valores promedio por debajo de 2mm.

**Variables contextuales: Puerto Boyacá**

- **Temperatura:**

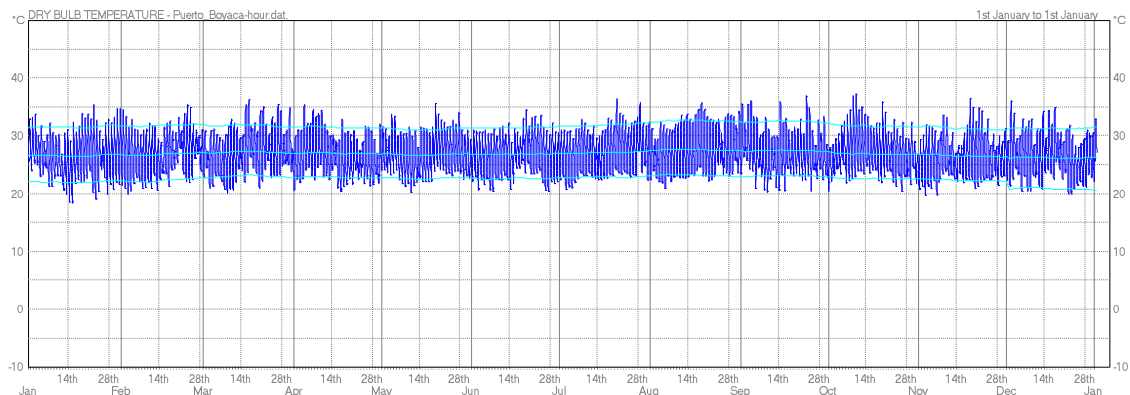


Figura 25 Temperatura de bulbo seco, Puerto Boyacá

Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

Según la Figura 25, en Puerto Boyacá se presenta un comportamiento térmico con rangos de

temperaturas máximas medias de 34.45°C, temperaturas promedio de 26.93°C y temperaturas bajas medias de 20.53°C; registrando el día más cálido del año el 11 de octubre con una temperatura máxima de 37°C y altos porcentajes de humedad en la madrugada y noche, como se visualiza en la Figura 26, y el día más frío del año es el 16 de enero reflejado en la Figura 27, con una temperatura mínima de 18°C y altos porcentajes de humedad tanto en la noche como en la madrugada.

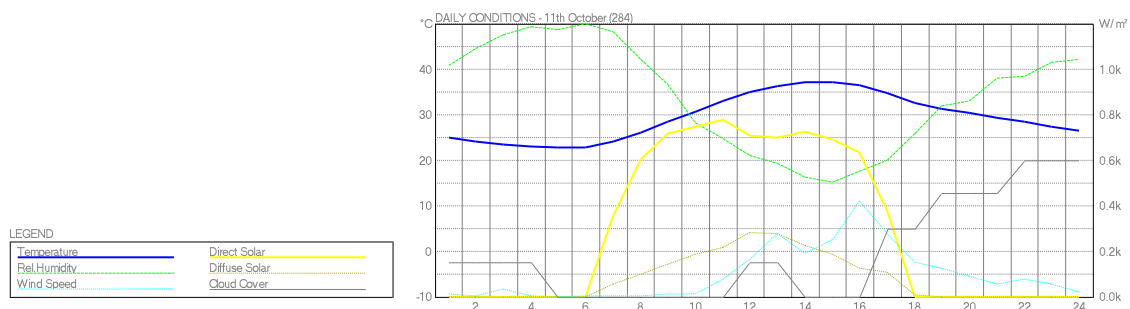


Figura 26 Día más cálido del año – 11 de octubre, Puerto Boyacá  
Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

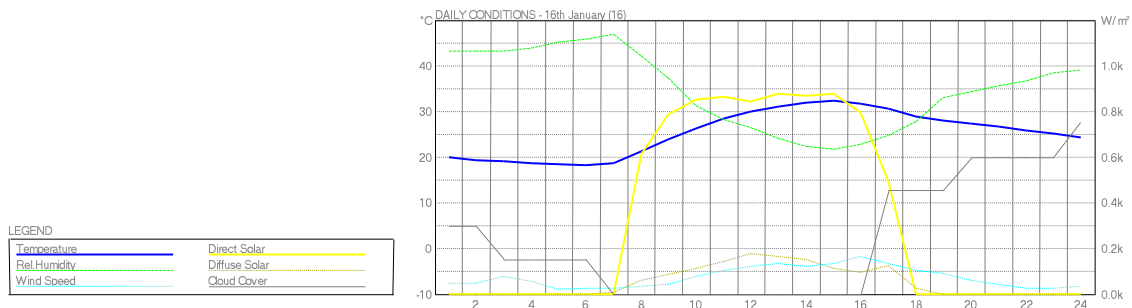


Figura 27 Día más frío del año – 16 de enero, Puerto Boyacá  
Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

Al analizar los anteriores datos, se comprueba que Puerto Boyacá se encuentra en un clima cálido, con altas temperaturas en el día y un alto porcentaje de humedad, lo que dispone unas condiciones térmicas altas, adversas para el cultivo, en consecuencia, se debe tomar como punto de partida el día más cálido para simular y evaluar las estrategias a utilizar, para alcanzar el rango ideal del cultivo.

- **Humedad relativa:**

La humedad relativa a lo largo del año se presenta en porcentajes promedios de 78% en la mañana y en la tarde de 67.66%, cifras altas en referencia al rango de confort humano que esta entre el 40% y 60%.

En la Figura 28 se plasma el comportamiento promedio de humedad relativa a lo largo del año, éste varía entre el 80% y 90%, con valores máximos promedio entre 90% y el 100% y valores mínimos promedio de 60% y 70%.

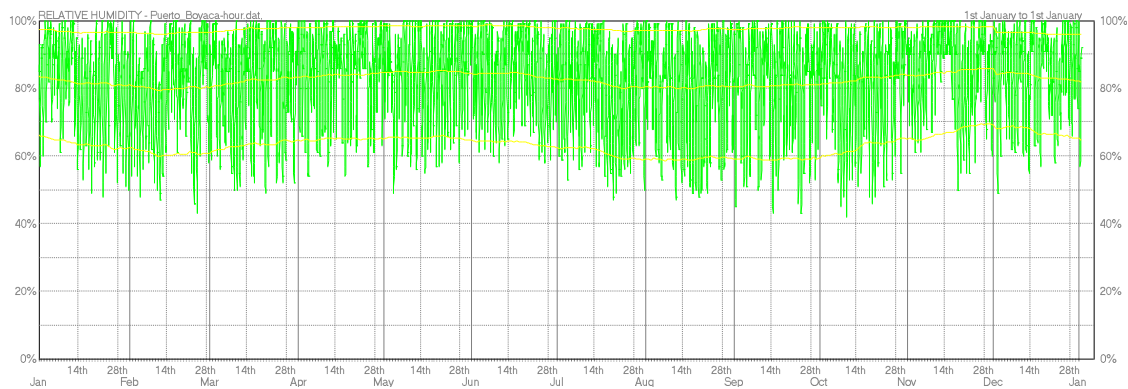


Figura 28 Humedad relativa, Puerto Boyacá

Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

- **Posición solar:**

Al ubicar el invernadero en Puerto Boyacá se indica a través del diagrama estereográfico (Figura 29) contrastado con la temperatura promedio, que la cara occidental del invernadero tendrá a lo largo del año temperaturas más altas que la cara oriental, además como lo representa la proyección ortográfica (Figura 30) a partir de las 8am habrá una elevación de la temperatura del lugar, teniendo un promedio anual de irradiación de  $604.69 \text{ Wh/m}^2$  el cual multiplicado por las 12 horas diarias de luz solar da una irradiancia promedio anual de  $7.256 \text{ W/m}^2$ .

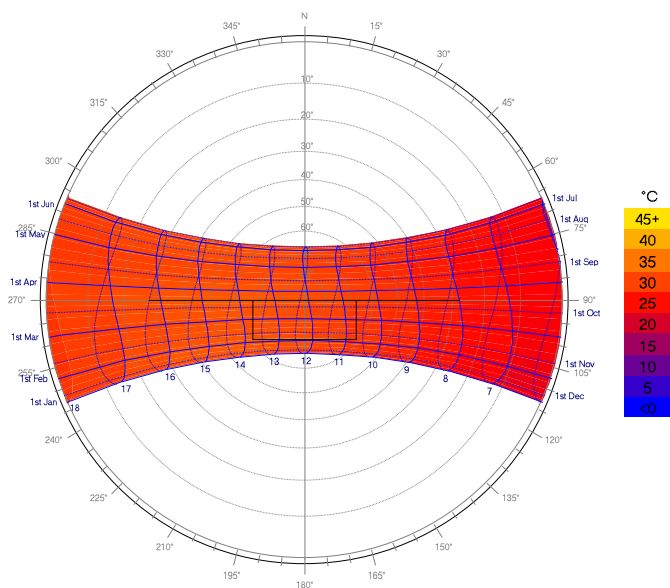


Figura 29 Proyección ortográfica – Temperatura promedio, Puerto Boyacá  
Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

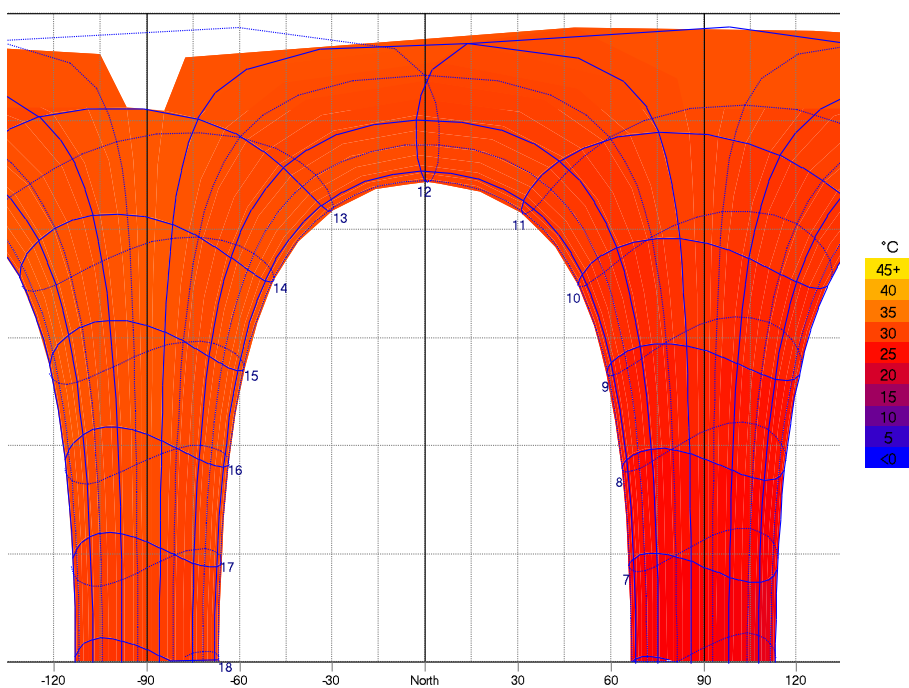


Figura 30 Proyección ortográfica – Temperatura promedio, Puerto Boyacá  
Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

En el caso de este contexto, se debe captar la menor cantidad de radiación solar diaria para tener temperaturas interiores más bajas, se obliga a orientar el volumen con las caras las largas sobre el norte y sur, así como lo exhibe la figura 31.

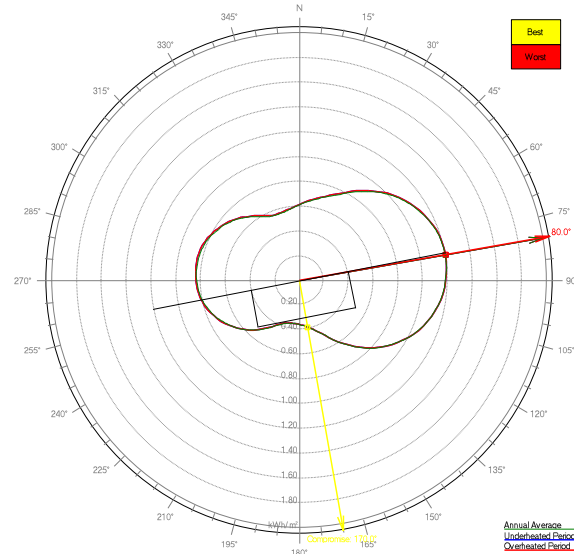


Figura 31 Orientación optima invernadero, Puerto Boyacá  
Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

#### - Viento:

A lo largo del año la dirección predominante del viento es oriente occidente con velocidades entre 5Km/h y 15Km/h durante más de 918 horas al año.

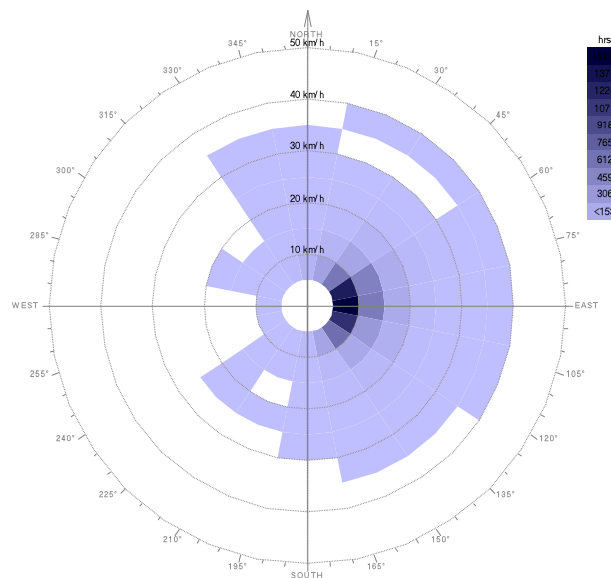


Figura 32 Dirección, duración y velocidad del viento anual, Puerto Boyacá  
Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

- **Precipitaciones:**

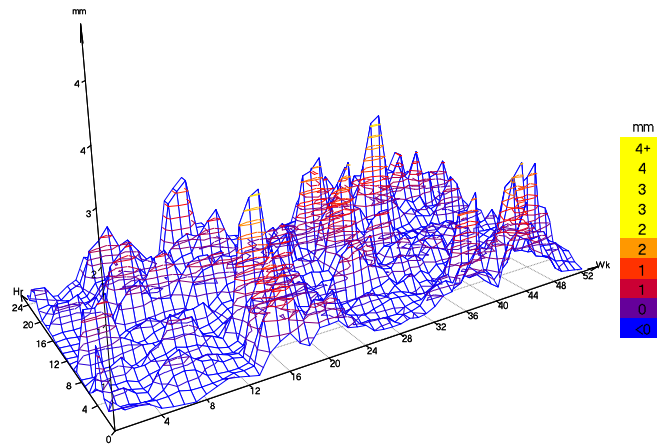


Figura 33 Precipitaciones anuales, Puerto Boyacá

Fuente: Datos obtenidos de Meteonorm 8, interpretados por Weather Tool, 2021. CC BY-NC-ND

Las precipitaciones en Puerto Boyacá al igual que en Sogamoso, no presentan ningún reto o problema sobre el diseño del invernadero a lo largo del año con valores promedio por debajo de 4mm.

**Condiciones ambientales: Arveja (*Pisum sativum* L.).**

Así mismo como las edificaciones destinadas para la ocupación humana deben cumplir con estándares de confort térmico, los invernaderos deben asegurar las condiciones ambientales ideales para que el cultivo disponga de un correcto desarrollo fenológico.

Para asegurar el desarrollo fenológico se deben analizar tres variables básicas como son: la temperatura, la humedad y la iluminación:

- **Temperatura:** varios autores contemplan un rango ideal y un rango máximo de crecimiento, al superar este último, la planta entra en un estado de estancamiento, suceso que lleva a una baja en los índices de producción,
- **Humedad:** cuando no se llega al intervalo mínimo, las estomas de la planta se cierran y se entorpece el proceso de fotosíntesis, con valores por encima del rango, se presenta

un estado que se denomina anoxia, que es la falta de oxígeno en las raíces por un alto índice de humedad en la tierra.

- **Iluminación:** se debe contemplar el nivel de saturación de la luz, el cual se determina como el rango mínimo y máximo de respiración de la planta, por debajo de él, no se lleva a cabo el proceso de fotosíntesis, y por encima la planta llega a su tope de velocidad de fotosíntesis.

A continuación, en las Figuras 34, 35 y 36, se exponen rangos establecidos por algunos autores, y la propuesta para este caso de estudio de cada una de las variables:

### Aspectos Climáticos

Sensibilidad a heladas..... : Medianamente resistente.  
 Etapa o parte más sensible a heladas ..... : Floración.  
 Temperatura crítica o de daño por heladas..... : -2 °C  
 Temperatura base o mínima de crecimiento..... : 5 °C  
 Rango de temperatura óptima de crecimiento..... : 15 a 20 °C  
 Límite máximo de temperatura de crecimiento... : 28 °C

Figura 34 Aspectos climáticos Arveja (*Pisum sativum* L.)  
 Fuente: (CIREN, 1989, p.15) CC BY-NC-ND

Aspecto	Requerimiento de la especie <sup>(1)</sup>
Altitud (m.s.n.m)	1800- 2800 m.s.n.m
Precipitación (mm/ciclo)	250 - 380 mm
Temperatura (°C)	13 °C - 18 °C
Humedad relativa (%)	70 % - 80 %
pH suelo (Unidades de pH)	5,5 - 6,5
Textura	Franco limoso, franco arcilloso.

Figura 35 Condiciones edafoclimáticas.  
 Fuente: extraído de (Saénz Torres, 2019, p.10) CC BY-NC-ND



Aspectos Climáticos	
Sensibilidad a heladas	Medianamente resistente
Etapa o parte más sensible a las heladas	Floración
Temperatura crítica o de daño por heladas	(-2°C)
Temperatura base o mínima de crecimiento	5°C
Rango de temperatura óptima de crecimiento	15°C - 20°C
Límite máximo de temperatura de crecimiento.	28°C
T° mínima, óptima y máxima de germinación	4°C ; 15-25°C; 34°C

Figura 36 Aspectos climáticos  
Fuente: extraído de (CIREN, 2017, p.1) CC BY-NC-ND

Teniendo en cuenta los rangos de temperatura y humedad expuestos anteriormente, se plantea un rango promediado, en el que se toman valores que algunos autores referencian solo en algunas de sus publicaciones; el resultado se muestra en la Tabla 3:

Rango de temperatura y humedad ideal	
Temperatura mínima de crecimiento	4,5 °C
Rango de temperatura optima	14,3 °C    21 °C
Temperatura máxima de crecimiento	31 °C
Humedad relativa	70%    80%

Tabla 3 Rango de temperatura y humedad ideal  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND

Los rangos de saturación lumínica de la arveja (*Pisum sativum* L.) según Lee & Whitmarsh (1989, p.935) se encuentran entre 100 y 1050  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  según se refleja en la Figura 37, adicionalmente Chen Lopez (2021) al evaluar la influencia de la luz en el crecimiento de los cultivos, presenta un rango entre 200 y 1000  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ , como se observa en la Figura 38.

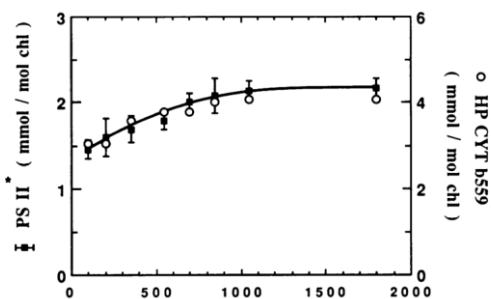


Figura 37 Intensidad de luz de crecimiento ( $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ )  
Fuente: (Lee & Whitmarsh, 1989, p.935) CC BY-NC-ND

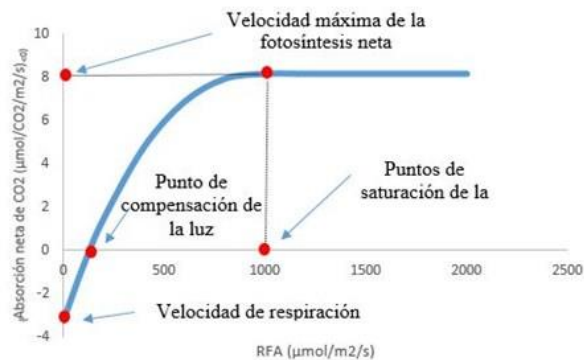


Figura 38 Punto de compensación de la luz y del punto de saturación de la luz

Fuente: (Chen Lopez, 2021) Disponible en la web: <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo/> CC BY-NC-ND

Tomando como punto de referencia los valores anteriores, para este caso de estudio se toma un rango de entre 200 y 1000  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ , con el fin de lograr convertir esta unidad a lux; es importante entender que 1  $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$  es igual a 1  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  o también llamado PPFD (photosynthetic photon flux density) con éste, se puede generar una conversión directa tal como se puede visualizar en la Figura 39, el desenlace, un rango entre 10.800 a 54.000 lux.

Luz de sol	
Si PPFD es:	entonces, lux es:
10	540
100	5400
200	10,800
300	16.200
600	32.400
1000	54.000
2000	108.000

Figura 39 PPFD a lux con luz solar

Fuente: APOGEE instruments. Disponible en la web: <https://www.apogeeinstruments.com/conversion-ppfd-to-lux/> CC BY-NC-ND

## Variables Físicas del invernadero:

En este apartado, se presentan como primera medida las variables físicas correspondientes a los tipos de invernadero a simular, los materiales que se plantean regularmente en las coberturas de los invernaderos y los aspectos de implantación del módulo.

## Variables físicas: Invernaderos

Tipo de invernadero	Número de unidades	Dimensiones	Metros
<b>Parral</b>	<b>1</b>	Altura cuerpo	2,5
		Altura cubierta	1,7
		Ancho	7,0
		Largo	21,0
<b>Raspa</b>	<b>3</b>	Altura cuerpo	2,5
		Altura cubierta	1,7
		Ancho	7,0
		Largo	21,0
<b>Asimétrico</b>	<b>3</b>	Altura cuerpo	4,0
		Altura cubierta	3,5
		Ancho	9,6
		Largo	21,0
<b>Capilla</b>	<b>3</b>	Altura cuerpo	4,0
		Altura cubierta	2,0
		Ancho	8,0
		Largo	21,0
<b>Diente de sierra</b>	<b>3</b>	Altura cuerpo	3,5
		Altura cubierta	1,5
		Ancho	8,0
		Largo	21,0
<b>Túnel</b>	<b>1</b>	Altura cuerpo	0,0
		Altura cubierta	5,0
		Ancho	8,0
		Largo	21,0
<b>Gótico</b>	<b>3</b>	Altura cuerpo	4,0
		Altura cubierta	2,5
		Ancho	8,0
		Largo	21,0
<b>Venlo</b>	<b>3</b>	Cuerpo	4,0
		Cubierta	1,5
		Ancho	3,2
		Largo	21,0

Tabla 4 Tipos de invernaderos y dimensiones  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND



Figura 40 Invernadero tipo parral

Fuente: IEP Invernaderos (2017). Disponible en la web: <http://www.inverelpilar.com/es/invernaderos/invernaderos-parral>  
CC BY-NC-ND



Figura 41 Invernadero tipo raspa

Fuente: IEP Invernaderos (2017). Disponible en la web: <http://www.inverelpilar.com/es/invernaderos/invernaderos-parral>  
CC BY-NC-ND



Figura 42 Invernadero tipo asimétrico

Fuente: NOVAGRIC (2016). Disponible en la web: <https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernaderos-asimetricos#:~:text=Se%20denominan%20Invernaderos%20Tropicales%20porque,m%C3%A1s%20inclinado%20que%20el%20otro>. CC BY-NC-ND



Figura 43 Invernadero tipo capilla

Fuente: NOVAGRIC (2016). Disponible en la web: <https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernaderos-capilla>





Figura 44 Invernadero tipo diente de sierra

Fuente: Hortelana. Disponible en la web: <http://www.hortelana.com/dientesierra.html> CC BY-NC-ND



Figura 45 Invernadero tipo túnel

Fuente: NOVAGRIC (2016). Disponible en la web: <https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/tipos-de-invernaderos/invernadero-tunnel> CC BY-NC-ND



Figura 47 Invernadero tipo gótico

Fuente: Hidroponía (2015). Disponible en la web: <http://hidroponia.mx/invernadero-tipo-gotico-cuales-son-sus-caracteristicas/> CC BY-NC-ND



Figura 46 Invernadero tipo venlo

Fuente: AgriExpo (2021). Disponible en la web: <https://www.agriexpo.online/es/prod/zwirs-projects-bv/product-181093-46772.html> CC BY-NC-ND

### Variables de materialidad: Materiales para envolverte

Este tipo de variables dentro del invernadero generan gran diferencia por su injerencia en la conservación o disipación de la temperatura interior, NOVAGR (2016) empresa líder en construcción de invernaderos en Europa, contempla 5 principales materiales a la hora de construir, en esta clasificación, se tienen en cuenta valores como transmitancia de calor y transparencia del material, tal y como se muestra en la Figura 48,

	Transp. Luz (%)	Transp. IR (%)	Transm. Calor (W/m <sup>2</sup> °C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Anti-goteo	Anti-polvo
PEBD	90	62-65	8-9	0,91-0,93	NO	SI
PEAD	90	62-65	8-9	0,96	NO	SI
EVA	90	11	6-7	0,92-0,93	NO	NO
PVC	90	20-30	7-8	1,16-1,5	SI	NO
PC	75-83	0	4-4,8	1,2	SI	SI

Figura 48 Características de los diferentes tipos de plásticos para invernaderos

Fuente: (NOVAGR, 2016). Disponible en la web: <https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/materiales-y-estructuras/plasticos-invernaderos> CC BY-NC-ND

Dichos materiales son los elegidos para utilizar en las simulaciones computarizadas al interior del DesignBuilder, y para evaluar su comportamiento en las diferentes tipologías de invernadero en la tercera fase de la metodología.

### Variables de implantación

Este tipo de variables van encaminadas a la evaluación de decisiones proyectuales tales como la orientación con la que se debe implantar el módulo a partir de la intención térmica que se deba asumir, dependiendo el tipo de clima que se maneje en el contexto, ya sea frío o cálido se puede evaluar a partir de simulaciones computarizadas cuya orientación es más benéfica para la disipación de altas temperaturas en climas cálidos y la conservación del calor interior en climas fríos.

## Fase II: Definición de variables y estructuración del árbol de decisiones

A partir de la recopilación y presentación de variables de la Fase I, se sintetizan aportando las condiciones climáticas en Sogamoso y Puerto Boyacá, en éstas se determina el rango temporal en el que se van a generar las simulaciones, como se evidencia en las Tabla 5 y Tabla 6, de igual forma se destaca el rango térmico requerido por el cultivo de arveja, el cual se puede captar en la Tabla 3, con esta información se obtiene un rango térmico base, así como el requerido por el cultivo.

Datos climáticos contextuales		Sogamoso
Temperatura	Max	20,78
	Prom	13,6
	Min	6
Humedad	Max	95
	Prom	75
	Min	55
Día más frío del año		16 de enero
Semana de simulación		Más fría
14	al	21
Enero		

Tabla 5 Datos Climáticos y semana de simulación Sogamoso  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND

Datos climáticos contextuales		Puerto Boyacá
Temperatura	Max	34,45
	Prom	26,93
	Min	20,53
Humedad	Max	95
	Prom	85
	Min	65
Día más cálido del año		11 de octubre
Semana de simulación		Más cálida
6	al	13
Octubre		

Tabla 6 Datos Climáticos y semana de simulación Puerto Boyacá  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND

Posterior a la definición de las variables térmicas de lugar y del cultivo, se procede a determinar las variables de forma, orientación y materialidad con su respectiva codificación:

Tipo de invernadero	Código
Tipo Parral	TP
Tipo Raspa	TR
Tipo Asimétrico	TA
Tipo Doble Capilla	TDC
Tipo Diente de Sierra	TDS
Tipo Túnel	TT
Tipo Gótico	TG
Tipo Venlo	TV

Tabla 7 Variables y codificación – Tipología  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND

Orientación	Código
Norte/sur	N/S
Oriente/Occidente	E/O
Nororiente/Suroccidente	NE/SO
Suroriente/Noroccidente	NO/SE

Tabla 8 Variables y codificación – Orientación  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND

Materiales	Código
Polietileno de baja densidad	PEBD
Polietileno de alta densidad	PEAD
Copolímero etileno vinil acetato	EVA
Policloruro de vinilo	PVC
Polycarbonato	PC

Tabla 9 Variables y codificación – Materialidad  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND

Luego de haber sintetizado las variables con las cuales se va a diseñar el invernadero, se procede a generar la metodología de diseño con la que se va a abordar tanto el proceso de simulación, como el árbol de decisiones, permitiendo con esto tener un orden lógico de las mismas.

Para esta metodología se adopta un orden establecido de la siguiente manera: como primera medida, se pone en consideración el elemento arquitectónico de diseño, en este caso el invernadero, con sus diferentes variables, evaluadas desde una orientación norte/sur; , en segunda instancia, se trae a colación la orientación en la que se deben implantar las tipologías con el fin de elegir en los dos casos, aquellas que fomenten un mejor desempeño térmico, y por último se evalúa el material con el que debe ser cubierto el invernadero, llegando en este último paso a la



mejor combinación de variables que se puede dar en el contexto (Figura 49), respecto al rango requerido por el cultivo.

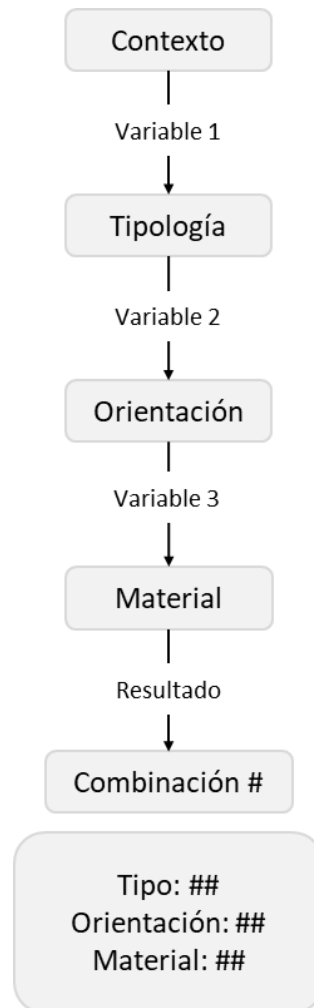


Figura 49 Metodología de diseño para invernadero  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND

Por su parte, teniendo como línea metodológica este orden de variables, se plantea el esqueleto inicial del árbol de decisiones, el cual contempla en cada uno de los pasos, las diferentes posibilidades, utilizando la codificación dada anteriormente; el árbol inicia expresando la intención de la metodología de diseño, de la cual parten dos caminos claros, en este caso los dos contextos analizados pasando por cada una de las variables, criterio que conlleva a las posibles combinaciones a implementar.

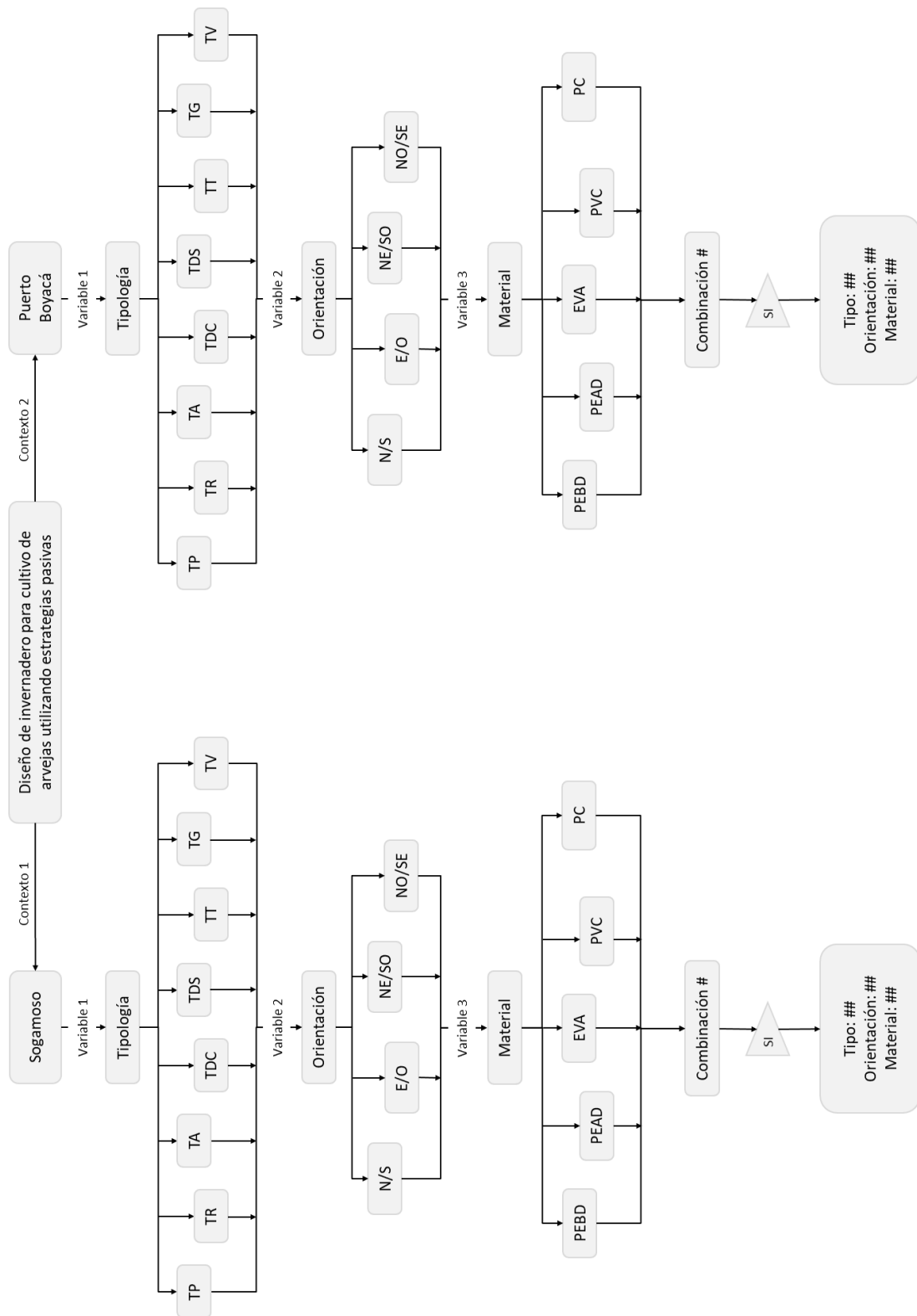


Figura 50 Esqueleto inicial árbol de decisiones  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND

A partir de este esqueleto inicial se tiene un punto de partida y un plan de simulación claro para abordar la fase III del proyecto como elemento organizador base, del cual se desprende el análisis general de las simulaciones y se retroalimentara con los resultados obtenidos.

### Fase III: Simulación computarizada y análisis de resultados

En esta etapa se hizo simulación de cada una de las variables anteriormente establecidas, comenzando por el modelado en DesignBuilder de las diferentes tipologías de invernadero; debido a las cualidades translúcidas de los plásticos utilizados para recubrir los invernaderos, se usó una distribución de superficie translúcida al 100% en toda la envolvente, como se evidencia en la Figura 51.

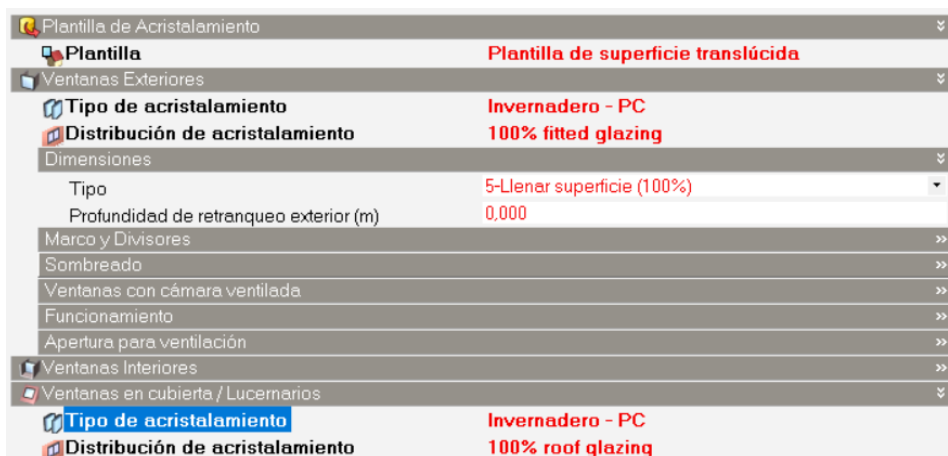


Figura 51 Configuración aberturas

Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

En consecuencia, se presenta en las Figuras 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58 y 59 las diferentes tipologías de invernadero modeladas en DesignBuilder, que contemplan las características físicas expresadas en la tabla 4.

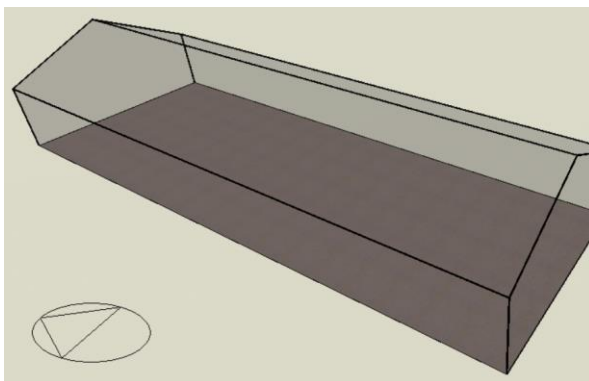


Figura 52 Invernadero tipo parral  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

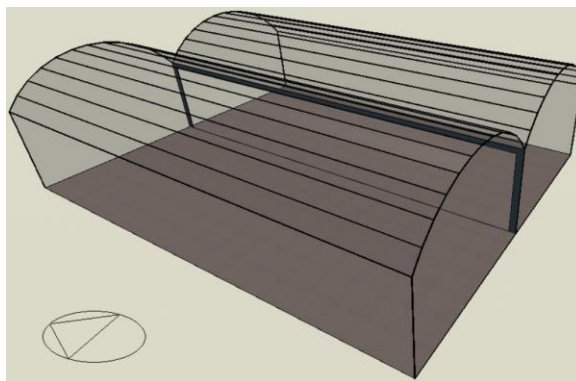


Figura 55 Invernadero tipo doble capilla  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

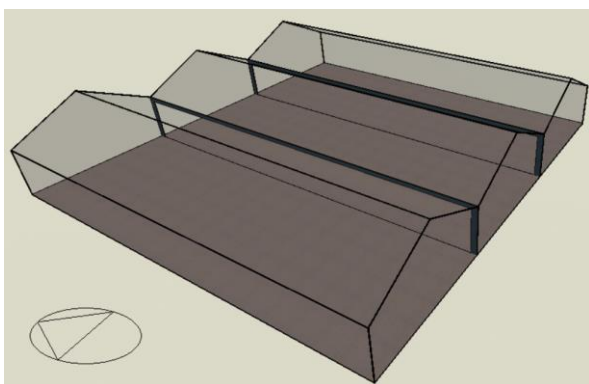


Figura 53 Invernadero tipo raspa  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

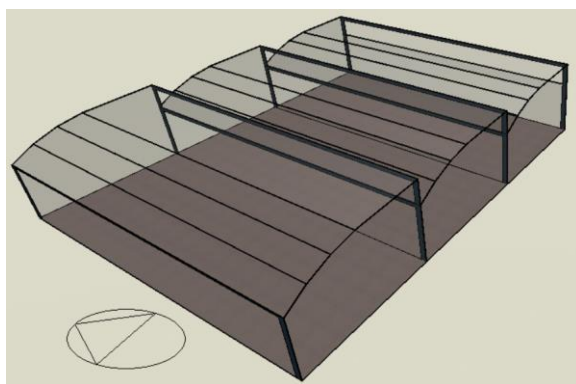


Figura 56 Invernadero diente de sierra  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

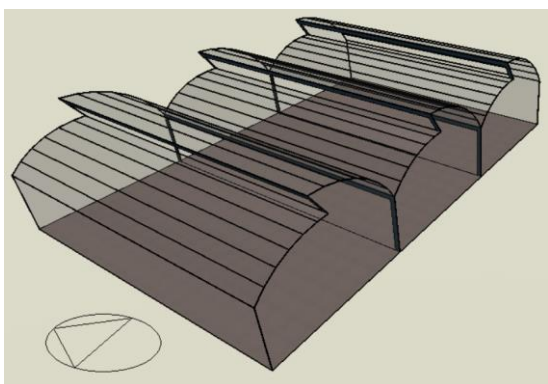


Figura 54 Invernadero tipo asimétrico  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

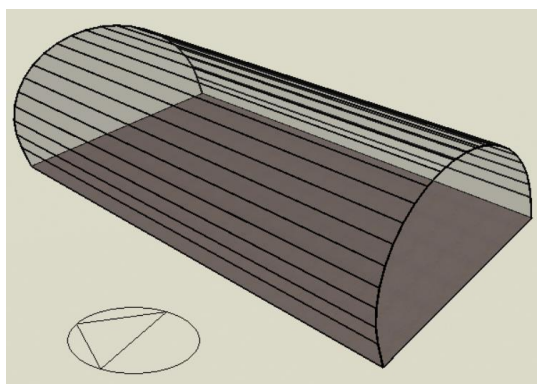


Figura 57 Invernadero tipo túnel  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

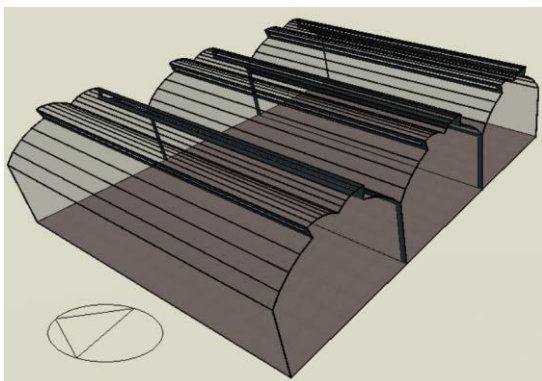


Figura 58 Invernadero tipo gótico  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

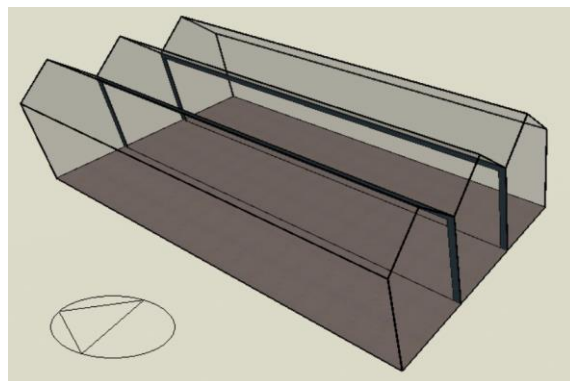


Figura 59 Invernadero tipo venlo  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

Igualmente, acto seguido se procede a ingresar en DesignBuilder, las características térmicas de los materiales, basados en los datos recopilados de la Figura 48, para la transmisión de luz y el Valor U ( $\text{W/m}^2\text{-K}$ ) de los mismos; en cuanto al valor de transmisión solar total (SHGC), se toman como referencia los datos obtenidos de insumos similares predefinidos por DesignBuilder.

General	
Nombre	Invernadero - PEBD
Descripción	
Fuente	EnergyPlus dataset
Categoría	Sencillo
Región	General
Color	
Método de definición	
Método de definición	2-Simple
Definición Simple	
Transmisión solar total (SHGC)	0,202
Transmisión de luz	0,900
Valor U ( $\text{W/m}^2\text{-K}$ )	6,200

Figura 60 Datos térmicos material PEBD  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

General	
Nombre	Invernadero - PEAD
Descripción	
Fuente	EnergyPlus dataset
Categoría	Sencillo
Región	General
Color	
Método de definición	
Método de definición	2-Simple
Definición Simple	
Transmisión solar total (SHGC)	0,202
Transmisión de luz	0,900
Valor U ( $\text{W/m}^2\text{-K}$ )	7,000

Figura 60 Datos térmicos material PEAD  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

General	
<b>Nombre</b>	Invernadero - EVA
Descripción	
Fuente	EnergyPlus dataset
Categoría	Sencillo
Región	General
Color	
Método de definición	
Método de definición	2-Simple
Definición Simple	
Transmisión solar total (SHGC)	0.202
Transmisión de luz	0.900
<b>Valor U (W/m²·K)</b>	<b>5.050</b>

Figura 61 Datos térmicos material EVA

Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

General	
<b>Nombre</b>	Invernadero - PVC
Descripción	
Fuente	EnergyPlus dataset
Categoría	Sencillo
Región	General
Color	
Método de definición	
Método de definición	2-Simple
Definición Simple	
Transmisión solar total (SHGC)	0.202
Transmisión de luz	0.900
<b>Valor U (W/m²·K)</b>	<b>5.830</b>

Figura 62 Datos térmicos material PVC

Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

General	
<b>Nombre</b>	Invernadero - PC
Descripción	
Fuente	EnergyPlus dataset
Categoría	Sencillo
Región	General
Color	
Método de definición	
Método de definición	2-Simple
Definición Simple	
Transmisión solar total (SHGC)	0.202
Transmisión de luz	0.750
<b>Valor U (W/m²·K)</b>	<b>3.500</b>

Figura 63 Datos térmicos material PC

Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

### Primera ronda de simulaciones:

Para el primer análisis tipológico de los invernaderos, fue establecida una orientación base, Norte/Sur (N/S), con una superficie translúcida del 100% y un material de policarbonato (PC), con el fin de lograr evaluar las diferentes tipologías bajo un mismo espectro.

En esta primera simulación se obtuvieron diferentes rangos de temperatura y humedad de cada una de las tipologías, fueron elegidas aquellas que estuvieron más cercanas al rango requerido por el cultivo (Tabla3) tomando únicamente como viables, los valores que están por debajo de la media respecto a la temperatura promedio; en las tipologías simuladas bajo las condiciones térmicas de Sogamoso (Tabla 5), se escogieron cinco, las cuales arrojaron temperaturas promedio inferiores o muy cercanas a 19°C, condiciones que la sitúan dentro de las tipologías de: invernadero asimétrico, diente de sierra, túnel y gótico.

Resultados Tipología							
Tipo de invernadero	Temperatura operativa			Humedad relativa			
	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	
TP	21,43	19,20	18,29	86,95	75,06	62,73	
TR	21,82	19,65	18,75	80,61	71,22	59,04	
TA	19,73	17,42	16,43	81,75	70,57	61,16	Pasa
TDC	21,26	19,19	18,32	77,39	69,01	57,70	
TDS	20,55	18,09	16,93	79,99	68,81	58,65	Pasa
TT	21,13	19,06	18,12	81,90	70,58	60,23	Pasa
TG	19,95	17,94	16,98	78,69	67,89	57,81	Pasa
TV	26,42	22,77	20,17	66,11	55,18	43,57	

Tabla 10 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías simuladas bajo el clima de Sogamoso  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

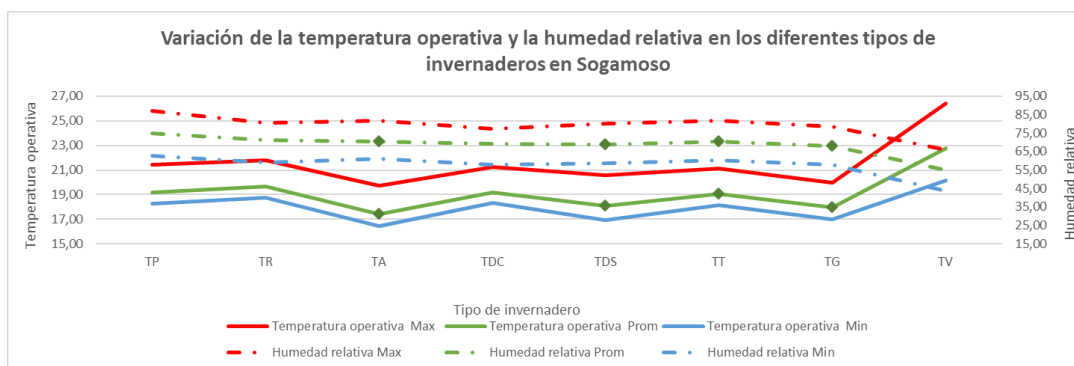


Figura 64 Variación de la temperatura operativa y la humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos en Sogamoso  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

En el caso de Puerto Boyacá, y teniendo en cuenta que este es un contexto más cálido, se toman únicamente como viables, los valores que están por debajo de la media respecto a la temperatura promedio, buscaron resultados con temperaturas por debajo o próximas a los 26°C, siendo los invernaderos tipo asimétrico, doble capilla, túnel y gótico los que cumplen con este requisito.

Resultados Tipología							
Tipo de invernadero	Temperatura operativa			Humedad relativa			
	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	
TP	27,22	26,11	24,14	87,31	77,15	68,35	
TR	27,36	26,27	24,33	86,44	76,83	67,66	
TA	26,78	25,76	24,16	82,90	76,39	68,61	Pasa
TDC	27,12	26,06	24,17	86,24	76,95	68,00	Pasa
TDS	27,28	26,26	24,45	82,81	75,46	67,44	
TT	27,15	26,06	24,10	87,48	76,82	68,41	Pasa
TG	26,80	25,85	24,19	83,71	75,91	67,79	Pasa
TV	27,40	26,38	24,50	85,62	75,58	65,78	

Tabla 11 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías simuladas bajo el clima de Puerto Boyacá  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND



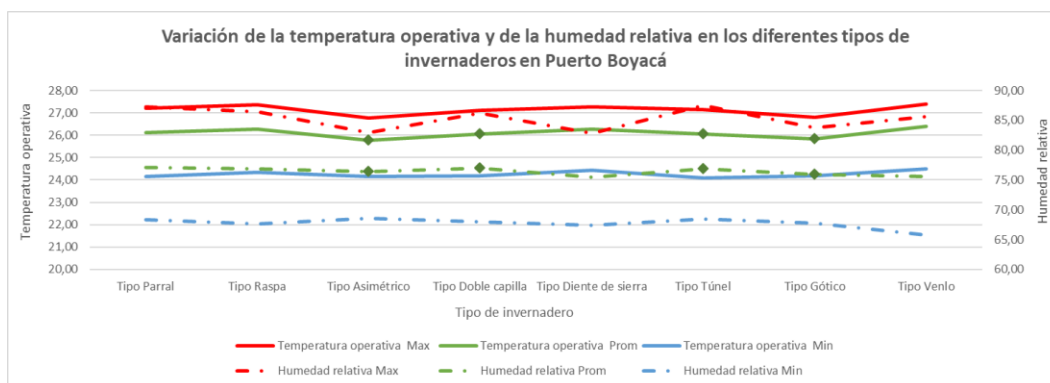


Figura 65 Variación de la temperatura operativa y la humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos en Puerto Boyacá

Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

## Segunda ronda de simulaciones:

Posterior al análisis de los anteriores resultados, se procede a la generación de simulaciones evaluando diferentes orientaciones (Tabla 12) de los módulos, para así poder determinar cuál orientación es más beneficiosa a cada uno de las tipologías de invernadero; en este caso no solo se evalúan las tipologías que pasaron en las primeras simulaciones, también se analizan las que no obtuvieron un buen resultado, esto con el fin de comprobar si al girar el invernadero, la dirección del viento beneficia la temperatura y humedad interior.

Según los resultados obtenidos en la simulación en el contexto de Sogamoso, se obtuvo que: el invernadero tipo asimétrico orientado de oriente a occidente y nororiente y suroccidente; diente de sierra orientado de noroccidente a suroriente; y tipo gótico orientado de norte a sur, tomando como validos los datos ubicados en el 30% inferior del total de los valores respecto a la temperatura promedio, aportaron los mejores resultados térmicos por debajo de los 18°C promedio, en este caso al girar el módulo se alcanzó un mejor resultado por parte de la tipología diente de sierra que de la tipología asimétrico, evidenciando que la dirección del viento es un factor primordial a la hora de evaluar la temperatura operativa interior.

Resultados orientación						
	Temperatura operativa			Humedad relativa		
	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min
TP						
E/O	21,14	19,08	18,24	88,62	75,98	63,50
NE/SO	21,19	19,07	18,22	87,94	75,79	63,91
TR						
NE/SO	21,74	19,60	18,75	81,00	71,71	59,87
NO/SE	21,78	19,62	18,75	81,85	71,83	60,12
TA						
E/O	19,66	17,34	16,39	81,87	70,74	61,29
NE/SO	19,58	17,29	16,38	81,94	70,87	61,48
TDC						
NE/SO	21,07	19,11	18,30	78,24	69,56	58,48
TDS						
N/S	20,55	18,09	16,93	79,99	68,81	58,65
NO/SE	20,32	17,93	16,87	80,25	69,05	58,87
TT						
N/S	20,97	18,90	18,06	82,77	70,93	61,14
NE/SO	20,95	18,92	18,07	82,47	71,12	60,97
TG						
N/S	19,95	17,94	16,98	78,69	67,89	57,81
NO/SE	19,68	17,96	17,18	77,02	67,51	57,68
TV						
E/O	25,79	22,48	20,20	66,07	55,71	43,77
NE/SO	25,88	22,47	20,19	66,80	56,05	44,33

Tabla 12 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías + orientación simuladas bajo el clima de Sogamoso  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

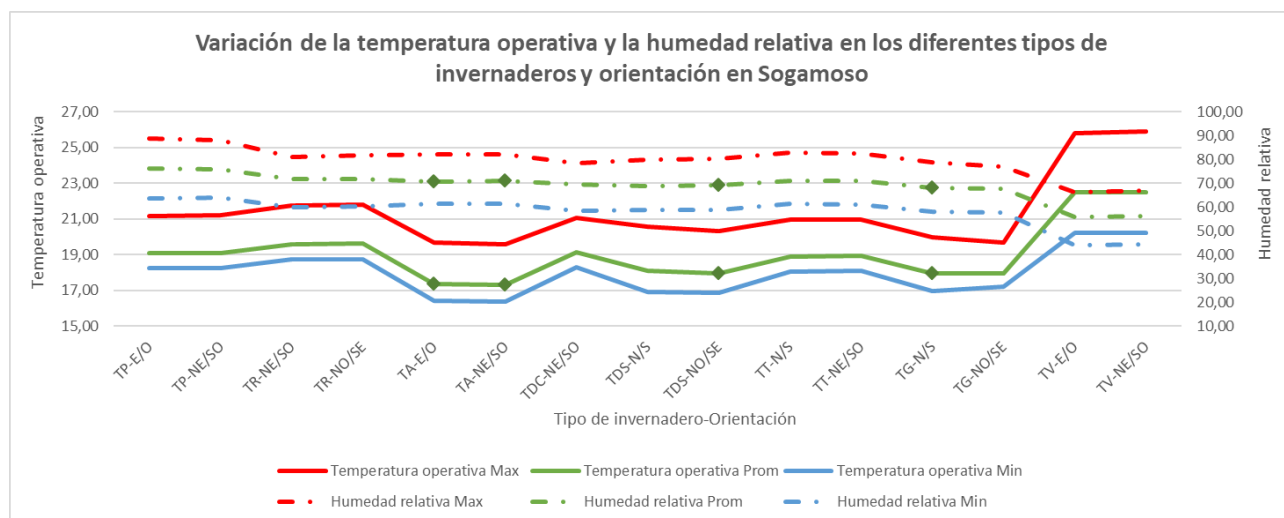


Figura 66 Variación de la temperatura operativa y la humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos y orientación en Sogamoso

Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

En cuanto a los resultados de Puerto Boyacá, se obtuvo que: el invernadero tipo asimétrico orientado de norte a sur y oriente occidente; tipo túnel orientado de oriente a occidente; y tipo gótico orientado de norte a sur y oriente occidente, tomando como validos los datos ubicados en el 30% inferior del total de los valores respecto a la temperatura promedio, tiendo los mejores resultados térmicos, ya que registraron temperaturas por debajo de los 26°C, razón por la que fue descartada la tipología diente de sierra, elegida en la primera ronda de simulaciones.

Resultados orientación						
	Temperatura operativa			Humedad relativa		
	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min
	TP					
E/O	26,97	25,89	24,06	88,26	78,04	69,69
NE/SO	27,12	26,07	24,13	87,59	77,52	69,22
	TR					
N/S	27,36	26,27	24,33	86,44	76,83	67,66
E/O	27,37	26,29	24,34	86,61	77,01	68,02
	TA					
N/S	26,78	25,76	24,16	82,90	76,39	68,61
E/O	26,79	25,78	24,16	83,21	76,31	68,52
	TDC					
N/S	27,12	26,06	24,17	86,24	76,95	68,00
E/O	27,06	26,01	24,19	85,97	77,10	68,74
	TDS					
N/S	27,28	26,26	24,45	82,81	75,46	67,44
E/O	27,22	26,18	24,42	82,86	75,60	67,63
	TT					
E/O	26,78	25,77	24,03	87,62	77,64	69,44
NE/SO	27,06	26,01	24,10	87,47	77,00	68,71
	TG					
N/S	26,80	25,85	24,19	83,71	75,91	67,79
E/O	26,87	25,87	24,25	84,10	76,15	68,00
	TV					
E/O	27,07	26,14	24,49	85,48	76,23	67,16
NE/SO	27,27	26,32	24,54	85,18	75,74	66,29

Tabla 13 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías + orientación simuladas bajo el clima de Puerto Boyacá  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

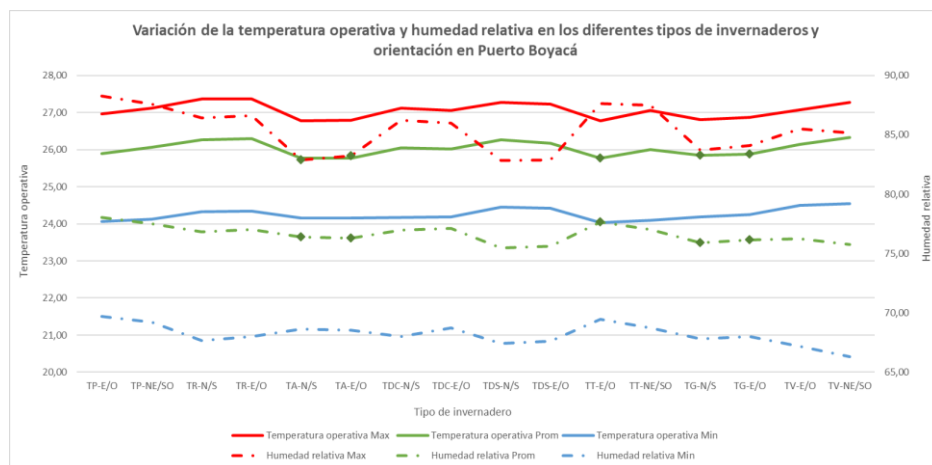


Figura 67 Variación de la temperatura operativa y la humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos y orientación en Puerto Boyacá

Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

### Tercera ronda de simulaciones:

En esta ronda de simulaciones se evalúan las combinaciones tenidas en cuenta anteriormente, además se analizan utilizando las variables de materiales (Tabla 14), que aportan la siguiente información: el invernadero tipo asimétrico orientado de oriente a occidente utilizando los materiales polietileno de baja densidad y polietileno de alta densidad, y tipo asimétrico orientado de nororiente a suroccidente utilizando los materiales polietileno de baja densidad y polietileno de alta densidad, tomando únicamente como viables, los valores que están por debajo de la media respecto a la temperatura promedio; lograron temperaturas promedio próximas a los 17°C, con temperaturas máximas no superiores a los 30°C e inferiores no menores a las 4,5°C, llegando así a estar en el rango térmico requerido por el cultivo, en cuanto a la humedad relativa manejada al interior del invernadero se obtuvo una humedad promedio dentro del rango permitido de 70% y 80%.

Resultados materiales							
	Temperatura operativa			Humedad relativa			
	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	
	TA			E/O			
PEBD	29,20	17,12	6,55	96,29	71,23	32,22	Pasa
PEAD	29,20	17,11	6,55	96,29	71,24	32,22	Pasa
	TA			NE/SO			
PEBD	29,10	17,05	6,53	96,42	71,45	32,15	Pasa
PEAD	29,09	17,05	6,53	96,42	71,44	32,15	Pasa
	TDS			NO/SE			
PEBD	29,86	17,56	7,03	95,45	70,20	30,84	
PEAD	29,85	17,55	7,03	95,46	70,21	30,84	
	TG			N/S			
PEBD	28,94	17,57	7,49	93,46	69,16	29,19	
PEAD	28,94	17,57	7,49	93,46	69,16	29,19	

Tabla 14 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías + orientación + material simuladas bajo el clima de Sogamoso  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

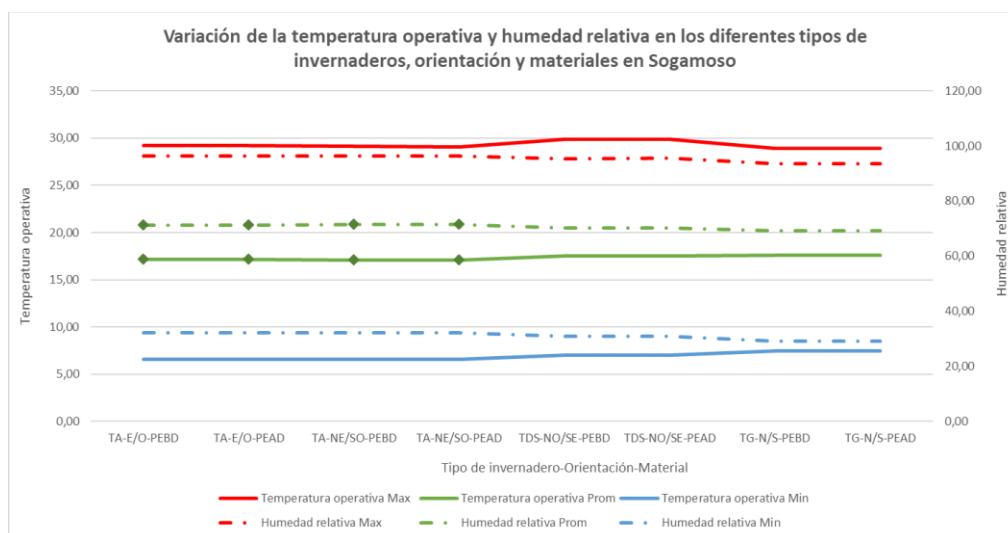


Figura 68 Variación de la temperatura operativa y humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos, orientación y materiales en Sogamoso

Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

Como resultado de las anteriores rondas de simulación, se generan cuatro posibles combinaciones entre las diferentes variables que son ideales para implementar un invernadero en Sogamoso para un cultivo de arveja.

Combinaciones finales	
Combinación 1	
Tipo	Tipo Asimétrico
Orientación	Oriente - Occidente
Material	Polietileno de baja densidad
Combinación 2	
Tipo	Tipo Asimétrico
Orientación	Oriente - Occidente
Material	Polietileno de alta densidad
Combinación 3	
Tipo	Tipo Asimétrico
Orientación	Nororiente - Suroccidente
Material	Polietileno de baja densidad
Combinación 4	
Tipo	Tipo Asimétrico
Orientación	Nororiente - Suroccidente
Material	Polietileno de alta densidad

Tabla 15 Combinaciones finales de invernadero ubicado en Sogamoso  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

Respecto a los resultados obtenidos en Puerto Boyacá, es oportuno indicar que el invernadero tipo asimétrico orientado de norte a sur utilizando los materiales polietileno de baja densidad y polietileno de alta densidad, y tipo túnel orientado de oriente a occidente utilizando los materiales polietileno de baja densidad y polietileno de alta densidad, tomando únicamente como viables, los valores que están por debajo de la media respecto a la temperatura promedio; con valores promedios por debajo de los 25,6°C, lo que permite llegar al rango de aceptabilidad que requiere el cultivo, de igual forma cabe resaltar que los rangos máximos de temperatura y humedad se encuentran muy por encima de los exigidos por el cultivo, lo cual obliga a buscar estrategias pasivas adicionales que logren reducir el rango entre temperatura promedio y máxima.

Resultados materiales							
	Temperatura operativa			Humedad relativa			
	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	
	TA			N/S			
PEBD	34,98	25,58	18,22	100,00	77,18	43,45	Pasa
PEAD	34,98	25,58	18,22	100,00	77,20	43,45	Pasa
	TA			E/O			
PEBD	35,02	25,61	18,21	100,00	77,05	43,39	
PEAD	35,02	25,61	18,21	100,00	77,05	43,39	
PVC	35,02	25,61	18,21	100,00	77,05	43,39	
	TT			E/O			
PEBD	36,21	25,55	17,64	100,00	79,84	40,40	Pasa
PEAD	36,21	25,55	17,64	100,00	80,01	40,40	Pasa
	TG			N/S			
PEAD	35,42	25,68	18,18	100,00	76,56	42,60	
PVC	35,42	25,68	18,19	100,00	76,57	42,60	
	TG			E/O			
PEAD	35,37	25,67	18,40	100,00	77,27	43,10	
PVC	35,36	25,67	18,40	100,00	77,26	43,10	

Tabla 16 Resultados temperatura y humedad relativa de tipologías + orientación + material simuladas bajo el clima de Puerto Boyacá

Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

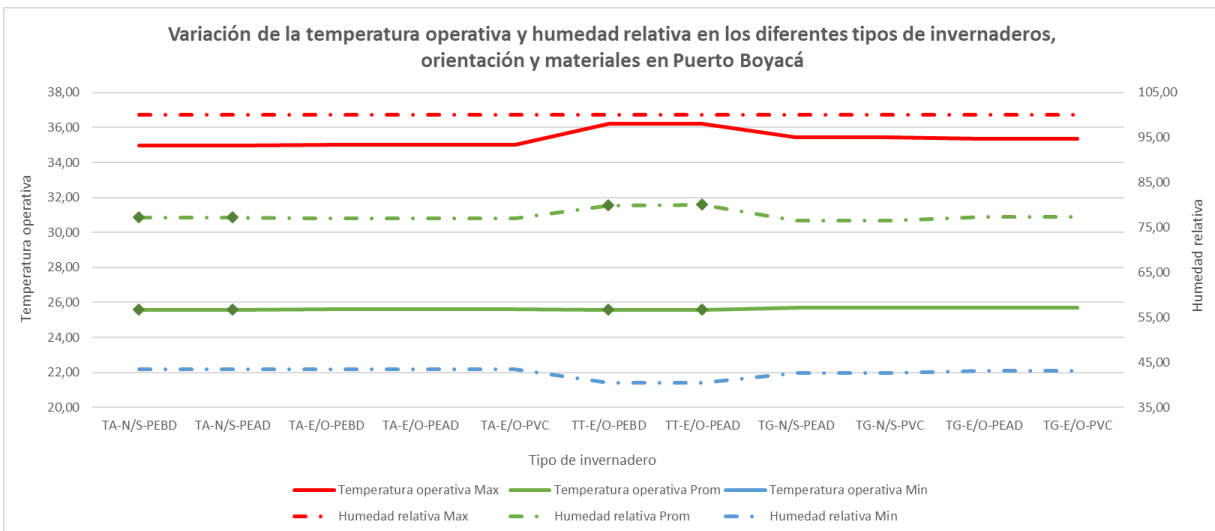


Figura 69 Variación de la temperatura operativa y humedad relativa en los diferentes tipos de invernaderos, orientación y materiales en Puerto Boyacá

Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

Por consiguiente, al recopilar todos los resultados obtenidos de las rondas de simulación, se presentan cuatro posibles combinaciones entre las diferentes variables que son ideales para implementar un invernadero en Puerto Boyacá para un cultivo de arveja.

Combinaciones finales	
Combinación 1	
Tipo	Tipo Asimétrico
Orientación	Norte - Sur
material	Polietileno de baja densidad
Combinación 2	
Tipo	Tipo Asimétrico
Orientación	Norte - Sur
material	Polietileno de alta densidad
Combinación 3	
Tipo	Tipo Túnel
Orientación	Oriente - Occidente
material	Polietileno de baja densidad
Combinación 4	
Tipo	Tipo Túnel
Orientación	Oriente - Occidente
material	Polietileno de alta densidad

Tabla 17 Combinaciones finales de invernadero ubicado en Puerto Boyacá  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

### Simulación de iluminación natural:

Al tener las combinaciones de las diferentes variables como lo son tipología, orientación y material en cada uno de los contextos, se genera un análisis de iluminación natural para cada combinación de variables, este análisis se genera con los datos de cielo evidenciadas en la Figura 71.

Cielo	
Método de cielo	1-Cielo estándar
Modelo de cielo	6-CIE día nublado (especificar ilu
Iluminancia del cenit (lux)	50000

Figura 70 Valores de simulación – Iluminación natural  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND



Teniendo en cuenta el rango de lux que debe tener el cultivo (Figura 37 y Figura 38) se procede a simular las cuatro combinaciones de cada uno de los contextos:

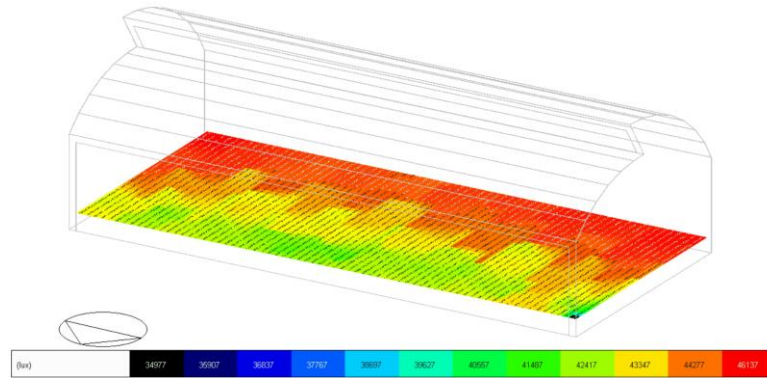


Figura 71 Simulación de iluminación natural Combinación 1 – Sogamoso  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

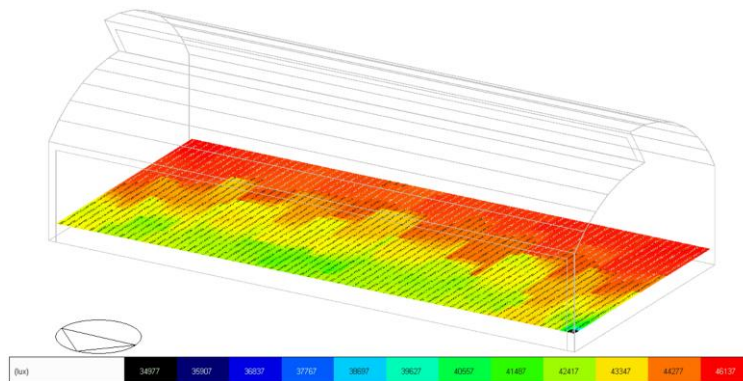


Figura 72 Simulación de iluminación natural Combinación 2 – Sogamoso  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

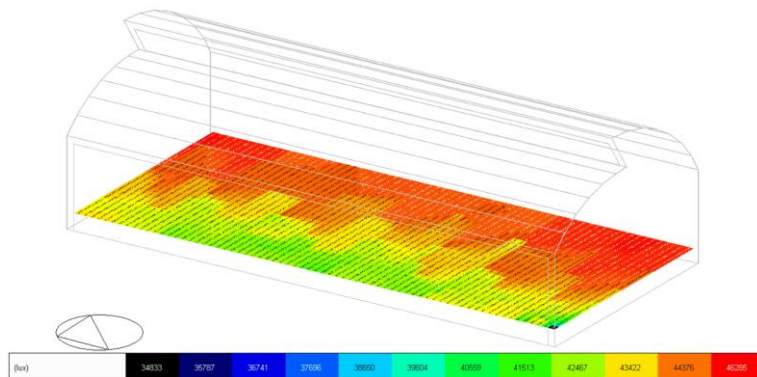


Figura 73 Simulación de iluminación natural Combinación 3 – Sogamoso  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

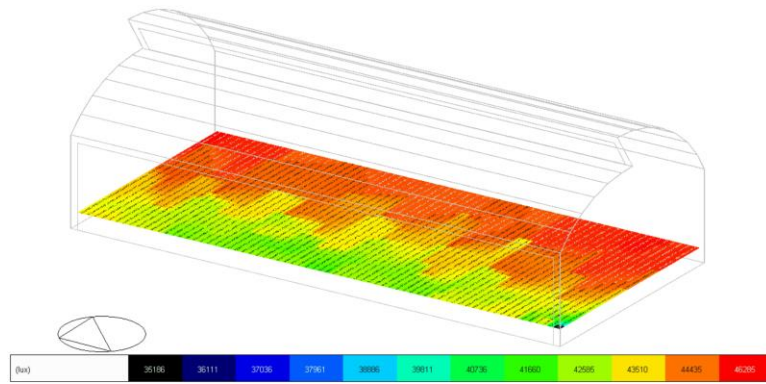


Figura 74 Simulación de iluminación natural Combinación 4 – Sogamoso  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

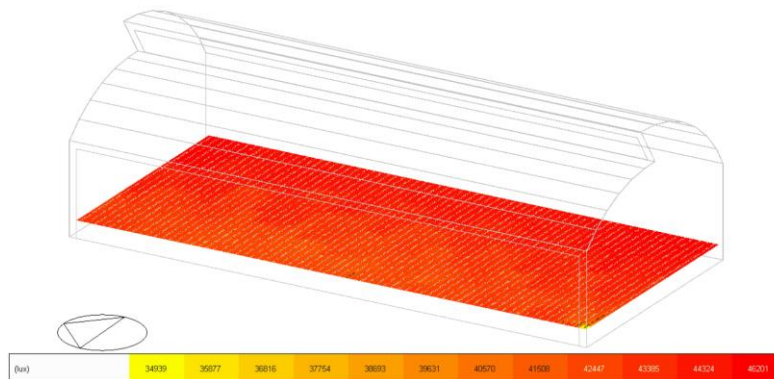


Figura 75 Simulación de iluminación natural Combinación 1 – Puerto Boyacá  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

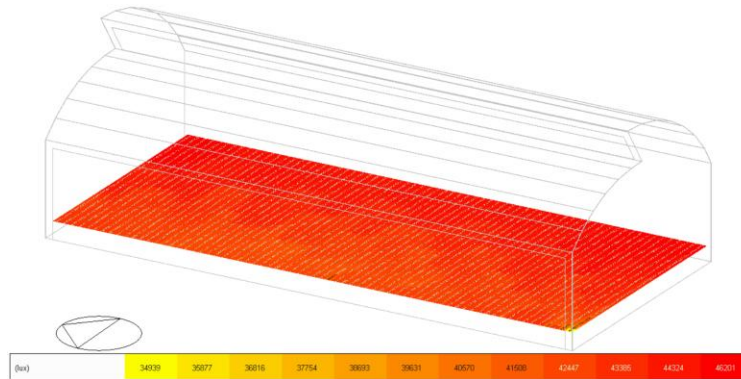


Figura 76 Simulación de iluminación natural Combinación 2 – Puerto Boyacá  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

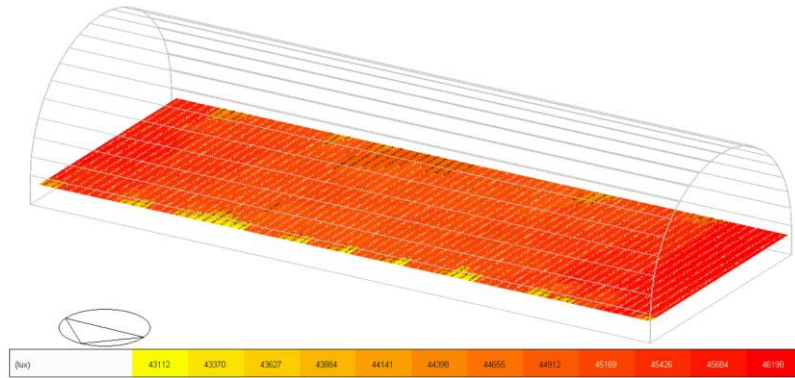


Figura 77 Simulación de iluminación natural Combinación 3 – Puerto Boyacá  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

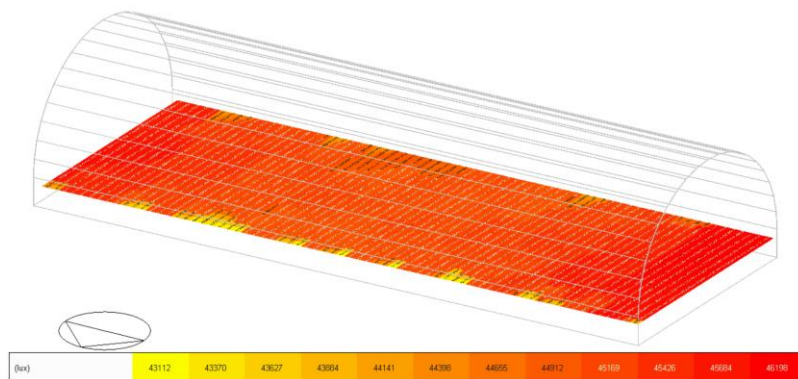


Figura 78 Simulación de iluminación natural Combinación 4 – Puerto Boyacá  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

Como resultado, se evidencia que todas las combinaciones están dentro del rango de 10.800 a 54.000 lux que requiere el cultivo para su crecimiento, siendo este el ultimo filtro de evaluación de la metodología planteada.

Finalmente, se obtiene un árbol de decisiones que contiene los diferentes resultados recopilados en cada ronda de simulación de los dos contextos evaluados, pasando por la variable 1 (tipología), en la que , se determina como resultado negativo las que no cumplen con los rangos requeridos, para luego repetir este proceso en la variable 2 (orientación) y variable 3 (material), obteniendo así, las mejores combinaciones de variables a las que se además les somete a un último filtro que consiste en evaluar los rangos de iluminación natural al interior del invernadero.



Por último, con la intención de bajar la temperatura máxima obtenida en Puerto Boyacá con las combinaciones, se implementa una estrategia pasiva adicional, que consiste en ubicar aperturas del 25% con rejillas en la parte superior de los invernaderos tipo asimétrico (Figura 81) y tipo túnel (Figura 82), con el fin de permitir una mejor circulación de aire al interior del invernadero.

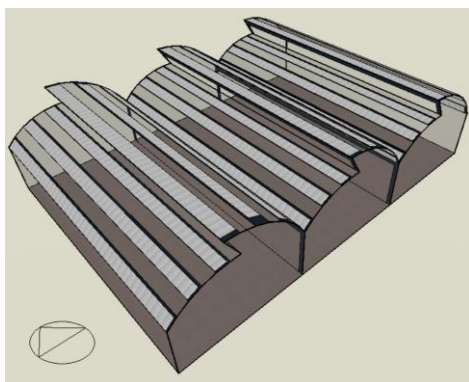


Figura 80 Invernadero tipo asimétrico con rejillas  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

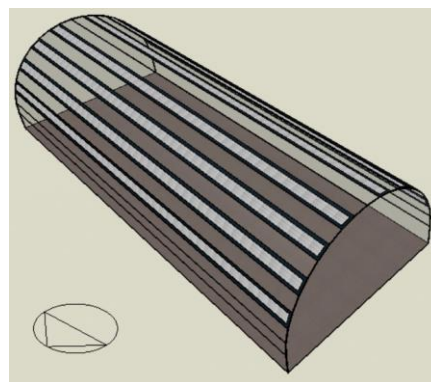


Figura 81 Invernadero tipo túnel con rejillas  
Fuente: imagen extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

	Temperatura operativa			Humedad relativa		
	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min
	Tipo Asimétrico			Norte - Sur		
Polietileno de baja densidad	33,40	25,20	18,56	100,00	77,69	45,10
Polietileno de alta densidad	33,40	25,20	18,56	100,00	77,69	45,10
	Tipo Túnel			Oriente - Occidente		
Polietileno de baja densidad	33,77	25,04	17,97	100,00	80,07	44,26
Polietileno de alta densidad	33,77	25,04	17,97	100,00	80,08	44,25

Tabla 18 Resultados de temperatura y humedad relativa con rejillas bajo el clima de Puerto Boyacá  
Fuente: información extraída de DesignBuilder, realización propia CC BY-NC-ND

En consecuencia, se logra una reducción en la temperatura máxima de 1.58°C en el caso del invernadero tipo asimétrico y de 2.44°C en el invernadero tipo túnel, circunstancia que abre la posibilidad de implementar estrategias adicionales dentro de las combinaciones obtenidas por la metodología, que permitan lograr rangos de temperatura que se adapten mejor a las condiciones ambientales del cultivo.

#### **Fase IV: Estructuración de la metodología de diseño a partir de resultados obtenidos**

Para esta última fase, se generan los árboles de decisión finales correspondientes a cada uno de los contextos, tomando como referencia únicamente los resultados positivos obtenidos, para obtener así una herramienta que confiere después de un proceso de simulaciones computarizadas y análisis de resultados, escoger en cada una de los contextos la combinación de estrategias pasivas más conveniente, para así mismo alcanzar las condiciones ambientales adecuadas para un correcto desarrollo fenológico de un cultivo de arveja.

Cada uno de los árboles parte desde la premisa de diseñar un invernadero para cultivo de arvejas utilizando estrategias pasivas, pasando luego por las variables de tipología, orientación y material, hecho que permite al usuario elegir alguna de dichas variables, en el caso de no tener la posibilidad de generarla, se tiene un resultado negativo que lo llevará bien sea, a no tener la viabilidad del diseño o en algunos casos a poder devolverse para elegir una variable diferente, como resultado, se obtienen las cuatro correctas combinaciones para el invernadero.

Estos árboles de decisiones se deben aplicar únicamente en el caso en el que se quieran tener resultados ambientales positivos, utilizando únicamente estrategias pasivas, para mitigar los daños generados a causa del cambio climático en los cultivos de arveja en campo abierto, reduciendo así la amenaza de sufrir problemas relacionados a la seguridad alimentaria y nutricional en el departamento de Boyacá, este es un instrumento destinado para campesinos y agrónomos que proporciona una solución a la generación de invernaderos.

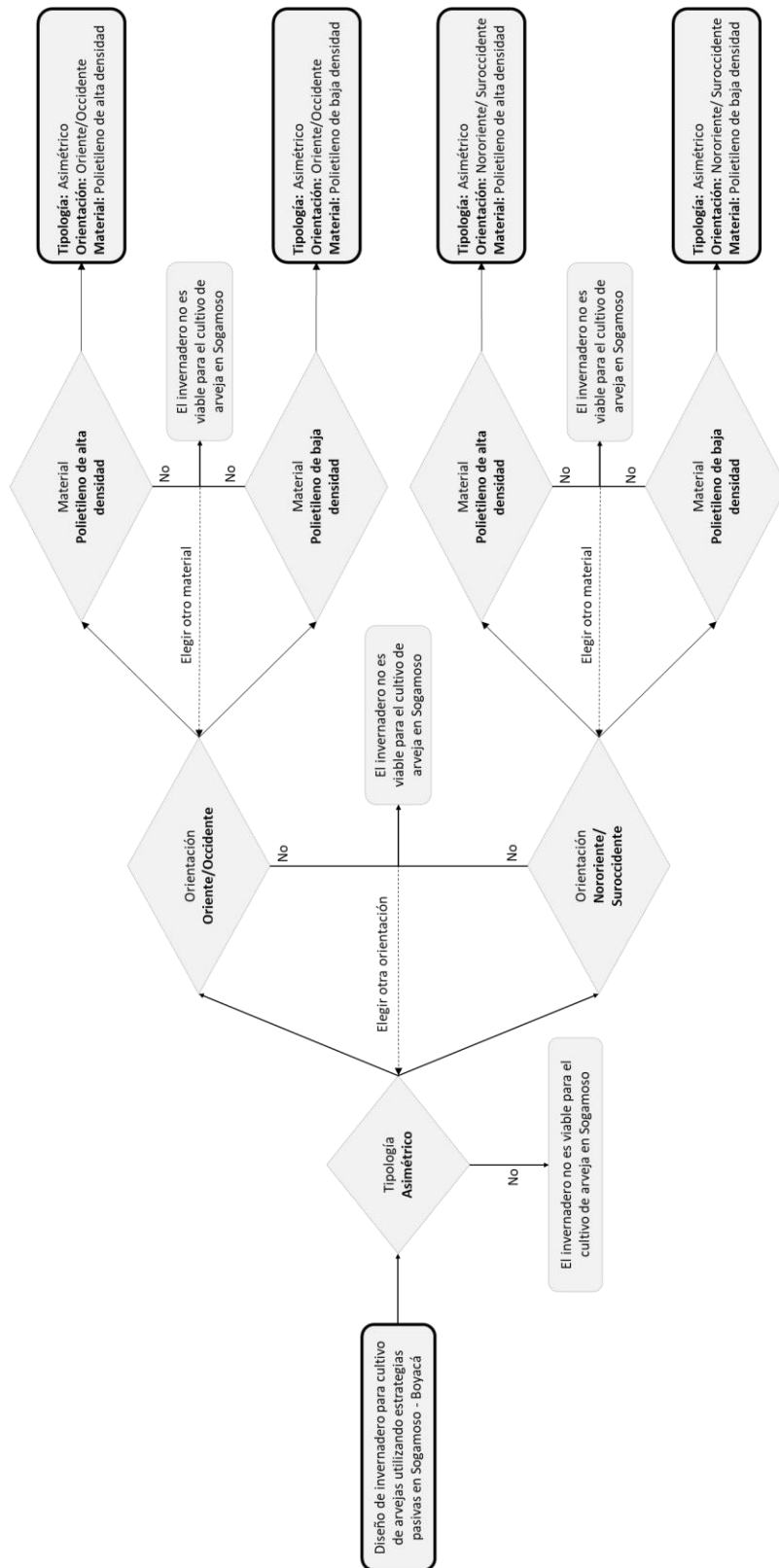


Figura 82 Árbol de decisiones final - Sogamoso  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND

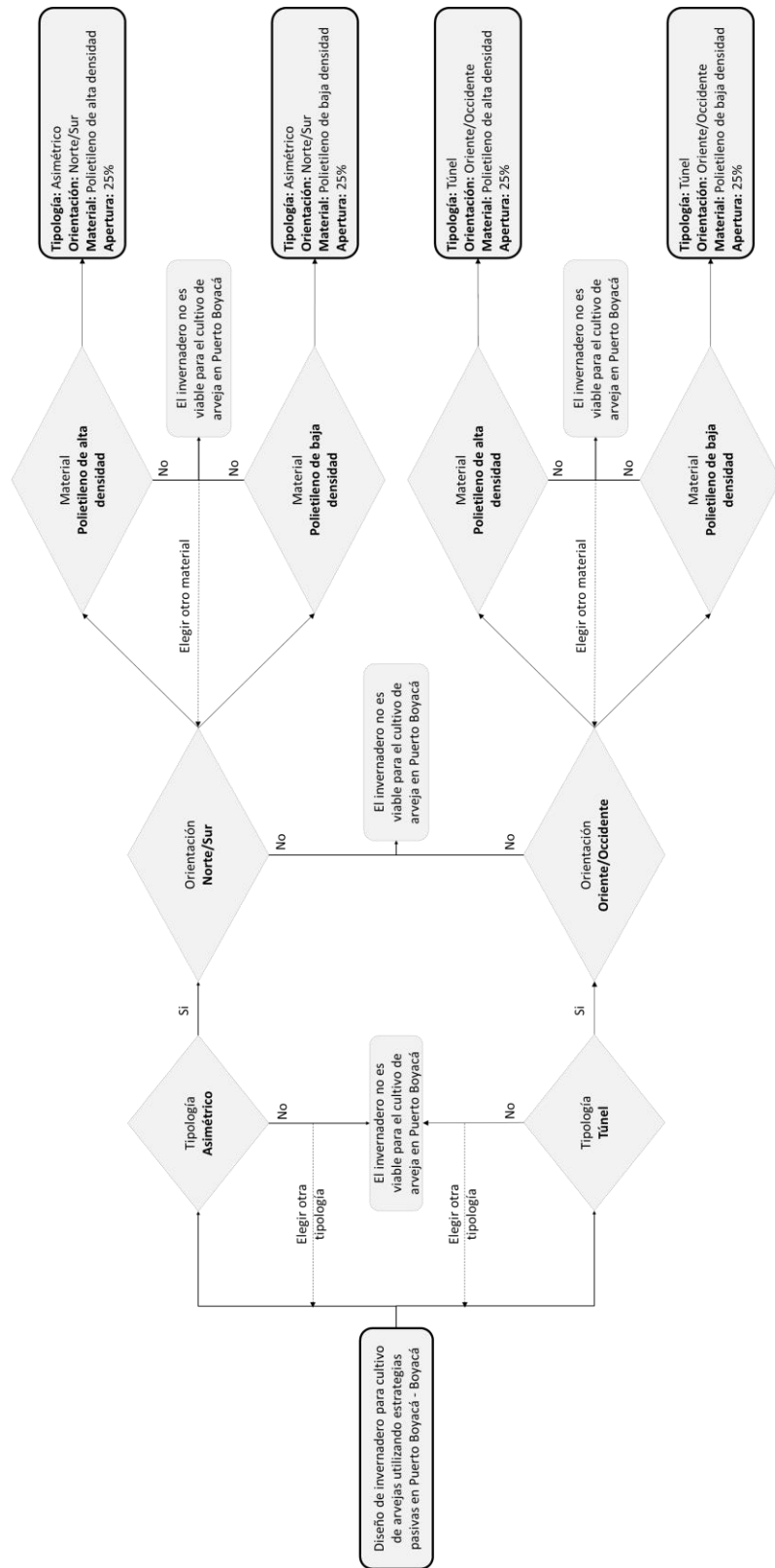


Figura 83 Árbol de decisiones final – Puerto Boyacá  
Fuente: Realización propia CC BY-NC-ND



**Límites de investigación:**

A lo largo de la investigación se identificaron algunos aspectos que deben tener en cuenta respecto a las variables que se pueden adicionar en futuras investigaciones a la metodología propuesta, con el fin de evitar obtener resultados poco fiables y que no perduren durante un rango temporal importante.

Por ende, se deben evaluar variables que sean constantes durante mínimo un rango de 10 años, y tener en cuenta su posible cambio respecto a este tiempo, por ejemplo, una variable contextual que evalué el microclima generado por un bosque cercano al invernadero, en este caso se debe contemplar que posiblemente en un corto tiempo este bosque podría no existir, cambiando completamente los rangos térmicos, afectando el correcto funcionamiento del invernadero.

En consecuencia, si se requiere adicionar alguna variable, primero se debe generar una investigación sobre el comportamiento temporal de la misma, proyectar como afecta al invernadero y de ser posible anticipar estos cambios con el fin de prolongar el tiempo de uso del invernadero.

## **Conclusiones:**

A partir de la estructuración e implementación de la metodología presentada en este trabajo surgen las siguientes:

- Con la aplicación de la metodología planteada, por medio del árbol de decisiones, se logra generar una herramienta que permite elegir una adecuada combinación con las variables de tipología, orientación y material, cumpliendo las condiciones ambientales requeridas por el cultivo, en los contextos de Sogamoso y en Puerto Boyacá.
- El desarrollo de la metodología implica la jerarquización de diferentes variables, iniciando por la que genera los resultados, a partir de las simulaciones computarizadas, con mayor fluctuación en las condiciones ambientales al interior del invernadero, comenzando por la tipología, seguido de la orientación hasta llegar a la simulación de la materialidad, la cual tiene el menor impacto sobre las condiciones ambientales.
- Utilizar los resultados obtenidos por medio de DesignBuilder de los diferentes parámetros evaluados, facilita la implementación de nuevas metodologías paramétricas enfocadas hacia la arquitectura sostenible, teniendo en cuenta que en algunos casos como los materiales plásticos translúcidos no se encuentran en la librería predeterminada del programa, requiriendo crearlos a partir de información recopilada de fabricantes.
- Los resultados seleccionados en cada una de las rondas se toman a partir del análisis del porcentaje de valores más próximos al rango requerido por el cultivo, en el caso de la primera simulación se toman los valores inferiores a la media, en la segunda y tercera ronda de simulaciones se toman los valores por debajo del 30% del total de los valores, en este proceso se debe analizar los datos obtenidos e identificar los valores de temperatura promedio que más se aproximan a los rangos requeridos por el cultivo.

- Para el contexto de Sogamoso la tipología de invernadero que tiene un mejor comportamiento térmico hacia los climas fríos es el tipo asimétrico, junto con una orientación de oriente/occidente o nororiente/suroccidente y utilizando como material de envolvente un plástico PEBD o PEAD.
- En el contexto de puerto Boyacá se obtienen dos diferentes tipologías de invernadero que se pueden implementar, éstas son el tipo asimétrico con orientación norte/sur y tipo túnel con orientación Oriente/occidente, cabe resaltar que en ambas opciones se puede hacer uso de los materiales plásticos de envolvente PEBD o PEAD.
- En el caso de no cumplir a cabalidad los rangos ambientales requeridos por el cultivo, se pueden implementar estrategias pasivas adicionales que permitan reducir la brecha de la variable ambiental, como en el caso de Puerto Boyacá, que a pesar de que la temperatura promedio está dentro del rango, la temperatura máxima se encuentra por encima en el caso del invernadero tipo asimétrico  $3.98^{\circ}\text{C}$ , y del tipo túnel  $5.21^{\circ}\text{C}$  en el día más caliente del año, situación que se puede contrarrestar por medio de la implementación de una estrategia pasiva adicional a la metodología, como la ubicación de rejillas a lo largo de la cubierta, alcanzando una reducción de temperatura de  $1.58^{\circ}\text{C}$  y  $2.44^{\circ}\text{C}$  respectivamente.
- El árbol de decisiones final presentado para los dos contextos (Figura 82 y 83) se plantea con el fin de lograr ser utilizado de forma fácil y clara tanto por profesionales especializados en el área de agronomía como personas con conocimientos empíricos dedicadas al campo, pasando por cada una de las variables evaluadas hasta llegar a la combinación que más se ajuste a las condiciones contextuales del terreno en el que se va a implantar el invernadero.

### **Líneas futuras de investigación:**

A lo largo de este trabajo se logran evidenciar algunas líneas futuras de investigación tomando como base esta investigación:

- Dentro de la investigación realizada sobre las tipologías de invernaderos de mayor uso, se nota una falta de innovación y propuestas desde la arquitectura pensadas para cumplir los requisitos ambientales de los cultivos.
- En lo que respecta a los materiales utilizados para la envolvente de los invernaderos se aconseja para futuras investigaciones incorporar materiales que no sean derivados del petróleo que cumplan con los requisitos del cultivo.
- Este tipo de metodología está pensada para ser un modelo replicable que se pueda implementar en diferentes contextos y con diferentes tipos de cultivos, por ende, se recomienda su uso, con el fin de robustecer las variables establecidas para lograr abarcar la mayor cantidad de contextos y cultivos y ser una herramienta que permita combatir los efectos del cambio climático sobre los cultivos de forma pasiva.

## Referencias bibliográficas

- AEMET. (2019). *Breve introducción a la Fenología*. <https://aemetblog.es/2019/02/23/breve-introduccion-a-la-fenologia/>
- Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo. (2018). Lecciones aprendidas sobre agricultura resiliente al cambio climático para contribuir a la seguridad alimentaria y al derecho a la alimentación en América latina y el caribe. In *AECID*.
- Alcaldía de Puerto Boyacá. (2021). *Información del municipio*. <https://www.puertoboyaca-boyaca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx#:~:text=Geografía%3A,margen derecha del Río Magdalena.&text=Al occidente con los municipios,por medio el río magdalena.>
- Alcaldía de Sogamoso Boyacá. (2018). *Geografía*. <http://www.sogamoso-boyaca.gov.co/municipio/geografia>
- Alvarez Sánchez, E., Leyva Retureta, G., Portilla Flores, E., & López Velázquez, A. (2014). Evaluation of thermal behavior for an asymmetric greenhouse by means of dynamic simulations. *Dyna*, 81(188), 152–159. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n188.41338>
- Asociación Española de Normalización. (2020). *UNE-EN 13031-1:2020*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0064610>
- BBCH. (1996). *Compendio para la identificació de los estadios fenológicos de especies mono- y dicotiledóneas cultivadas*.
- Berlanga Silvente, V., Hurtado Rubio, M. J., & Vilà Baños, R. (2013). Cómo aplicar árboles de decisión en SPSS. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca En Educació*, 6(1), 65–79–79.

<https://doi.org/10.1344/reire2013.6.1615>

Buendía Eisman, L., Colás Bravo, M. P., & Hernández Pina, F. (1998). *Métodos de investigación en Psicopedagogía*.

CAR, & DRN. (2020). *Informe del registro e impactos de heladas en el territorio car durante enero de 2020*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5e543336c829c.pdf>

Caracol Tunja. (2020a). *Los cultivos de flores también sufren los estragos de las heladas en Boyacá*. [https://caracol.com.co/emisora/2020/12/20/tunja/1608504881\\_304316.html](https://caracol.com.co/emisora/2020/12/20/tunja/1608504881_304316.html)

Caracol Tunja. (2020b). *Se adelantaron las heladas en Boyacá, surgen de manera atípica en diciembre*. [https://caracol.com.co/emisora/2020/12/14/tunja/1607959075\\_033093.html](https://caracol.com.co/emisora/2020/12/14/tunja/1607959075_033093.html)

Castillero Mimenza, O. (n.d.). *Los 11 tipos de variables usados en investigación*. Psicología y Mente. <https://psicologiaymente.com/miscelanea/tipos-de-variables>

Chen Lopez, J. (2021). *La influencia de la luz en el crecimiento del cultivo*. PROMIX. <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-influencia-de-la-luz-en-el-crecimiento-del-cultivo/>

CIREN. (1989). *Requerimientos De Clima Y Suelo: Frutales De Hoja Caduca* (Vol. 85).

CIREN. (2017). *Información De Avance Proyecto: Arveja*. <https://www.ciren.cl/wp-content/uploads/2017/12/Lechuga.pdf>

Coronado Hernández, G. (2017). *Influencia de las estrategias de diseño pasivo en la reducción del consumo energético de la tipología de edificio docente de la República Dominicana mediante el BIM*. Universidad de Sevilla.

- Cortés, Y., & Alarcón, J. C. (2016). Impactos del cambio climático sobre las áreas óptimas de nueve cultivos en Cundinamarca - Colombia. *Temas Agrarios*, 21(2), 51–64.  
<https://doi.org/10.21897/rta.v21i2.901>
- DANE. (2019). *Geovisor Encuesta Nacional Agropecuaria*.  
<https://geoportal.dane.gov.co/geovisores/territorio/resultados-ena/?lt=4.456007353293281&lg=-73.2781601239999&z=5>
- DANE. (2020). *Precios mayoristas y abastecimiento - 14 de febrero de 2020*. 67–69.
- Díaz Sarmiento, H. O., & Solano Rojas, O. F. (2006). *Diseño y simulación del control climático para un invernadero y base de datos de registro*. UNIVERSIDAD DE LA SALLE.  
[https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_automatizacion](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion) Citación
- FAO. (2020). *Producción sostenible y resiliente ante el cambio ejercido por la emergencia sanitaria*.
- FAO. (2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/goals/goal-2/es/>
- Flores Velázquez, J., López Cruz, I. L., Mejía Sáenz, E., & Montero Camacho, J. I. (2014). Evaluación del desempeño climático de un invernadero baticenital del centro de México mediante dinámica de fluidos computacional (CFD). *Agrociencia*, 48, 131–146.
- Herrero domínguez, M. (2020). *Optimización de un proyecto con estrategias de diseño pasivo mediante la aplicación de la metodología bim*. Universidad de Sevilla.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2017). *Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.

- Jarma Orozco, A., Cardona Ayala, C., & Araméndiz Tatis, H. (2012). Efecto del cambio climático sobre la fisiología de las plantas cultivadas: una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 63–76. <https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n1.2012.803>
- JUÁREZ PLATA, A. Y. (2019). *Diseño de un sistema de climatización para invernaderos utilizando energía solar*. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA DISEÑO.
- Lee, W.-J., & Whitmarsh, J. (1989). Photosynthetic Apparatus of Pea Thylakoid Membranes: Response to Growth Light Intensity. *Plant Physiology*, 89(3), 932–940. <https://doi.org/10.1104/pp.89.3.932>
- Lucidchart. (2021). *Qué es un diagrama de árbol de decisión*. <https://www.lucidchart.com/pages/es/que-es-un-diagrama-de-arbol-de-decision>
- Martínez, Pedro F, Roca, D., Suay, R., Martínez, M., Blasco, X., Herrero, J. ., & Ramos, C. (2002). Avances en el control de los factores del clima para el cultivo en invernadero. *Comunitat Valenciana Agrària-Revista d'Informació Tècnica, Horticoles*, 29–47.
- Martínez, Pedro Florián, & Roca, D. (2011). El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado. *Sustratos, Manejo Del Clima, Automatización y Control En Sistemas de Cultivo Sin Suelo.*, 179–245. [https://www.researchgate.net/publication/237100819\\_El\\_control\\_del\\_clima\\_de\\_los\\_invernaderos\\_de\\_plastico\\_Un\\_enfoque\\_actualizado](https://www.researchgate.net/publication/237100819_El_control_del_clima_de_los_invernaderos_de_plastico_Un_enfoque_actualizado)
- Ministra de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). *Circular Externa* (Issue ESTRUCTURAS LIVIANAS PARA INVERNADEROS).
- Morales Pacheco, L. A. (2012). Arquitectura paramétrica aplicada en envolventes complejas en



base a modelos de experimentación en el diseño arquitectónico. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 6(3), 1–11.

Navarrete, S. (2014). *Diseño paramétrico. El gran desafío del siglo XXI*. 63–72.

NOVAGR. (2016). *Plásticos para Invernadero*. <https://www.novagric.com/es/venta-invernaderos-novedades/materiales-y-estructuras/plasticos-invernaderos>

ROJAS CARDONA, O., VACA LOZANO, J. Z., & VACA LOZANO, Y. A. (2017). *Manual de usuario para el sistema automatizado de invernadero hidropónico*. UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13093/1022343620.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Saénz Torres, S. M. (2019). *Implementación de un módulo de producción sostenible de arveja ( Pisum sativum) como aporte a la seguridad alimentaria de la vereda Páramo Lagunas, municipio de San Pablo de Borbur, Boyacá*. UNIVERSIDAD DE LA SALLE FACULTAD.

Villagrán Munar, E. A., & Bojacá Aldana, C. ricardo. (2019). Determinación del comportamiento térmico de un invernadero colgante colombiano aplicando simulación CFD. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28.

Weather Atlas. (n.d.). *Previsión meteorológica y clima mensual Sogamoso, Colombia*. [https://www.weather-atlas.com/es/colombia/sogamoso-clima#humidity\\_relative](https://www.weather-atlas.com/es/colombia/sogamoso-clima#humidity_relative)

Weather Spark. (n.d.). *Clima promedio en Puerto Boyacá*. <https://es.weatherspark.com/y/23389/Clima-promedio-en-Puerto-Boyacá-Colombia-durante-todo-el-año#Sections-Temperature>

